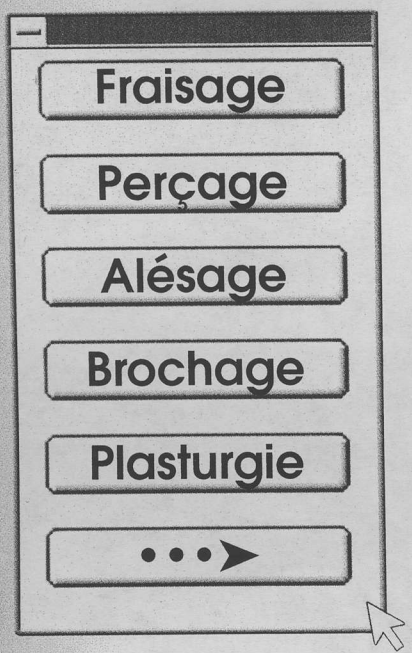
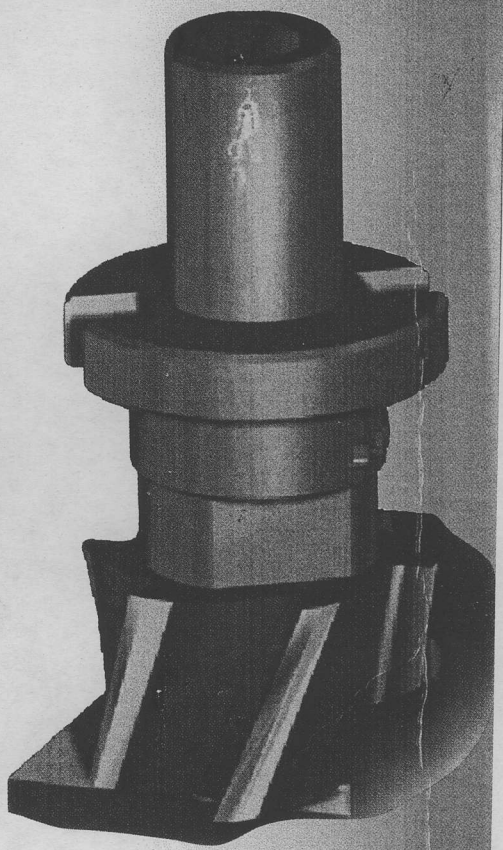
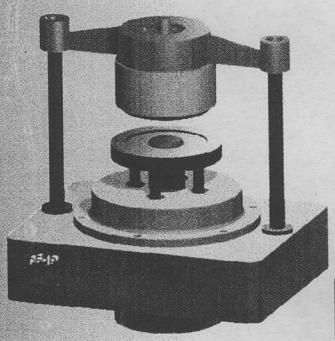
LES GUIDES INDUSTRIELS

Delagrave

GUIDE DE L'USINAGE

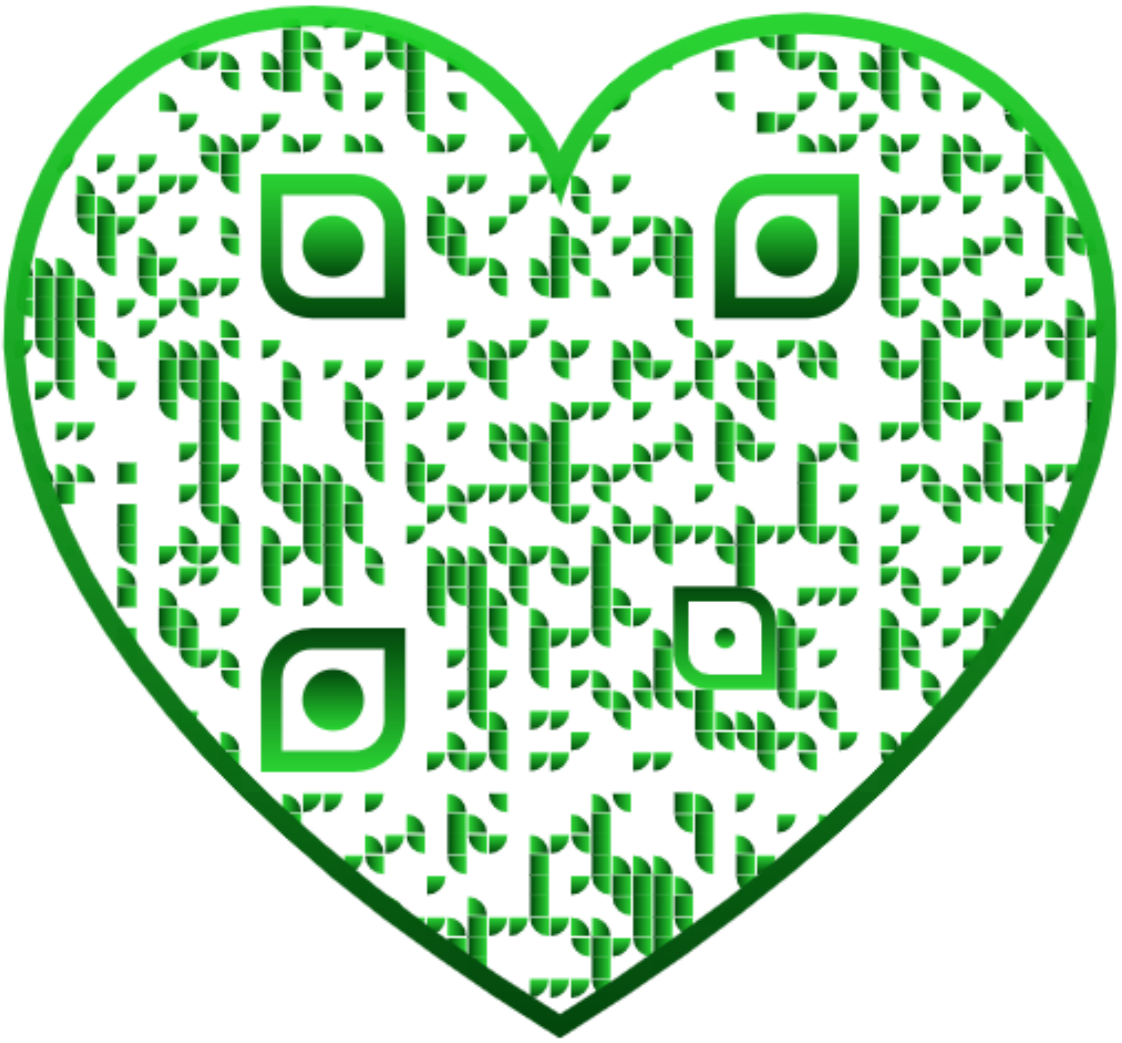






Delagrave

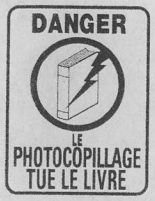
SHOUT
SHARE
IT



Nous remercions les ingénieurs et cadres des entreprises et des marques suivantes qui nous ont mis notre disposition les nombreux documents qui illustrent cet ouvrage :

A. Klink Gmbh
Air liquide
Amf
Andréa
Avyac
Baltec
Boehringer
Bolhof Otobre SA
Branson
Charmilles Technologie
Citizen
CMS
Cogsdill-Numeaton Ltd
Colly
Comet et Suhner
Command
Dubuis électrochimie
Editions techniques des industries de la fonderie
Escoffier
Evard précision SA
Extrude Hone
Fässler
Fladder
Flow-System
Forkardt
Framet-Loctite
Frömag
Gendron
Gildemeister-Devlieg Walter
Gobel et Hotz
Grundin
Guhring
Guiliani
Guillemin
Harding Brothers
Intégi
IRLE
Iscar
Kellenberg Hardinge
Kennametal Hertel
Kepal
La revue métiers de NUM SA
LASAG-Industrial-lasers
Leclerc
LGB Bricaud SA
Lorentz
Magafor
Mägerle
Manigley
Mazak
Mikron
Nikken
Norbert
Norelem
Norton
Novex
Outilec
Oxymill
P.W. Weidling et Sohn
PCI Meudon
Perfor
Pfauter
Plansee TIZIT
Production Suisse
Realmeca
RGA industries
Röhm
Rotomors
Roto-Mors-Torino
Sagop
Sandvik-Coromant
SDP
Seco
Sermac
SMU
Société Georges Fisher
Somab
Stellram
Sumitomo-Electric
System 3R
Technéta
Toyoda
Trumpf
Vardex
Vargus
Vitrazon Unicorn international
Voumard
Weingärtner
Widia

Remerciement à M. Christian Patoz pour ses directives pédagogiques ainsi que M. Bernard Labur, Pierre Maga et Laurent Pelt pour leur précieuse collaboration.



La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayant cause, est illicite » (alinéa 1er de l'article 40).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivant du Code Pénal.

© DELAGRAVE Édition – 2000
ISBN 2-206-08222-5

DELAGRAVE Édition – 15, rue Soufflot – 75254 Paris cedex 05
E-mail : delagrave@delagrave-edition.fr
Web : delagrave-edition.fr

SOMMAIRE

Le lecteur trouvera en début de chaque chapitre un sommaire détaillé.

Chapitre 1 **Procédés d'alésage** 1

Chapitre 2 **Procédés d'assemblage** 2

Chapitre 3 **Procédés de brochage** 3

Chapitre 4 **Procédés de découpe** 4

Chapitre 5 **Procédés d'érosion** 5

Chapitre 6 **Procédés de filetage** 6

Chapitre 7 **Procédés de forgeage** 7

Chapitre 8 **Procédés de formage** 8

Chapitre 9 **Procédés de fraisage** 9

Chapitre 10 **Procédés de moulage** 10

Chapitre 11 **Procédés de perçage** 11

Chapitre 12 **Procédés de rectification** 12

Chapitre 13 **Procédés de superfinition** 13

Chapitre 14 **Procédés de taillage, rectification et superfinition des dentures** 14

Chapitre 15 **Procédés de tournage** 15

Chapitre 16 **Procédés d'ébavurage** 16

1 PROCÉDÉS D'ALÉSAGE

1. Généralités 9
   1.1 Opérations d'alésage 9
   1.2 Mouvements générateurs 9
   1.3 Précisions obtenues 9
2. Outils utilisés : Outils de forme et outils d'enveloppe 10
   2.1 Outils de forme : Alésoirs, broches 10
   2.2 Outils d'enveloppe 14
   2.3 Choix d'utilisation des outils d'alésage 16
3. Alésage à l'outil de forme 18
   3.1 Surépaisseur d'usinage 18
   3.2 Évacuation des copeaux 18
   3.3 Conditions de coupe des alésoirs 19
   3.4 Alésage à l'alésoir monobloc 19
4. Alésage à la barre 20
   4.1 Généralités 20
   4.2 Barres d'alésage à outils réglables 22
   4.3 Barres d'alésage multi-outils 25
   4.4 Lames d'alésage sur barre 26
   4.5 Têtes à aléser et surfacer 26
   4.6 Conditions de coupe des barres d'alésage 26
   4.7 Système automatique d'alésage de précision 27
   4.8 Têtes d'alésage de forme 28
5 Alésage à la fraise 28
6. Mise en œuvre 29
   6.1 Puissance de coupe 29
   6.2 Outillage porte-pièce(s) 29
   6.3 Machines 30

1. Généralités

Production par coupe de formes cylindriques intérieures, débouchantes ou borgnes, à l'aide d'outils d'enveloppe et de forme, en travaux d'ébauche et de finition, avec une précision généralement de qualité 7.

1.1 Opérations d'alésage

Elles s'effectuent sur perceuses, fraiseuses, tours, aléseuses, centres d'usinage et centres de tournage, brocheuses, rectifieuses, et sont à inclure dans les phases d'usinage de ces machines.

1.2 Mouvements générateurs

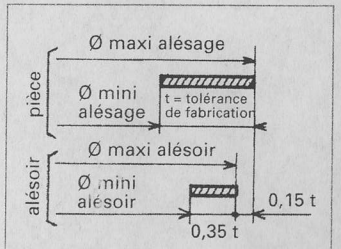
(À l'exclusion du brochage).
Coupe : Mouvement de rotation donné généralement à l'outil.
Avance : Mouvement donné à la pièce (fraiseuses, centres d'usinage) ou à l'outil (aléseuses, tours, centres de tournage, perceuses, rectifieuses).

1.3 Précisions obtenues

Elles dépendent des conditions de mise en œuvre (suite des opérations, matériaux à usiner, machine, lubrification, rigidité outil et pièce) (fig. 1.1).
La tolérance de fabrication (m6) des alésoirs est définie pour l'obtention des alésages H7, dans des conditions normales d'utilisation (NF E- 74- 100) (fig. 1.2).

Outils utilisés en suite d'opérations	Qualités obtenues		
	Diamètre (H...)	État de surface (Ra)	Rectitude sur 100 mm (centièmes)
Foret + alésoir	H7	0,8 – 1,6	20
Foret + foret aléseur + alésoir	H7	0,4 – 0,8	5
Foret + grain + alésoir ou grain	H7 – H6	0,4 – 0,8	2
Brut (moulage, forgeage) + foret aléseur + alésoir	H7	0,4 – 0,8	10
Brut (moulage, forgeage) + foret aléseur + alésoir	H7 – H6	0,4 – 0,8	2

FIGURE 1.1 Précisions usuelles obtenues en alésage.



ø mm de ... à	– 3	3 6	6 10	10 18	18 30	30 50	50 80
H8	+ 11 + 6	+ 15 + 8	+ 18 + 10	+ 22 + 12	+ 28 + 16	+ 33 + 19	+ 39 + 22
H7	+ 8 + 4	+ 10 + 5	+ 12 + 6	+ 15 + 8	+ 17 + 9	+ 21 + 12	+ 25 + 14
H6	+ 5 + 2	+ 6 + 3	+ 7 + 3	+ 9 + 5	+ 11 + 6	+ 13 + 7	+ 16 + 9

FIGURE 1.2 Tolérances de fabrication des alésoirs (NF E 74.100). Écart en µm des alésoirs.

Précision diamétrale.
Obtenue en cote-outil (outils de forme) ou cote-fabriquée (outils d'enveloppe), en qualité usuelle : 7 à l'outil de forme (alésoir, broche) et outil-fraise d'enveloppe ; 6 avec outil d'enveloppe (grain sur barre et outil à aléser).

Précision géométrique

Circularité. De qualité usuelle : 6 avec alésage ébauche précédant alésage finition à l'alésoir ou à la broche ; 7 avec finition à la fraise deux tailles.
Rectitude. Elle est fonction de : rigidité du couple broche porte-broche/outil ; obtention du trou d'ébauche et des opérations d'alésage.
Avec utilisation d'un grain d'alésage (barre ou outil à aléser) : correction de défaut de rectitude avant opération d'alésage finition.

État de surface

Obtention usuelle de : 0,8 à 0,4 Ra avec alésoirs, barres d'alésage, outils à aléser, broches ; 1,8 à 0,8 Ra avec fraises deux tailles ; 0,4 à 0,02 Ra avec meule.

2. Outils utilisés : outils de forme et outils d'enveloppe

2.1 Outils de forme : Alésoirs, broches.

Alésoirs.

Ils sont utilisés essentiellement en finition sur perceuses, fraiseuses, centres d'usinage, tours, centres de tournage, aléseuses, (fig. 1.3).

Caractéristiques

Outils de forme, monoblocs avec queue ou alésage de maintien normalisés (NFE- 66-001 ., 74-100). Ils ont de trois à douze dents (arêtes de coupe) selon leurs utilisations fonctionnelles.
Arêtes coupantes : Elles sont courtes, d'angle de direction d'arête $K_r = 60°$ (cas général). Le guidage outil s'effectue par les listels (arêtes secondaires) qui prolongent chaque arête de coupe de longueur au moins égale à 0.5 du diamètre normal (fig. 1.4).
Les alésoirs sont en acier rapide et à lames brasées carbure (micrograins K15 revêtu TIN).

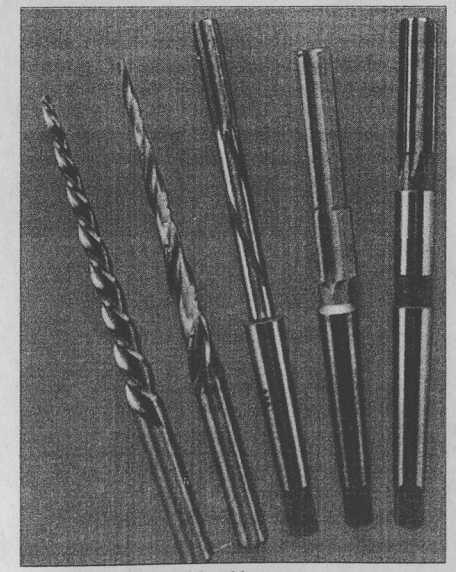


FIGURE 1.3 Alésoirs Monoblocs.
Doc. Magafor

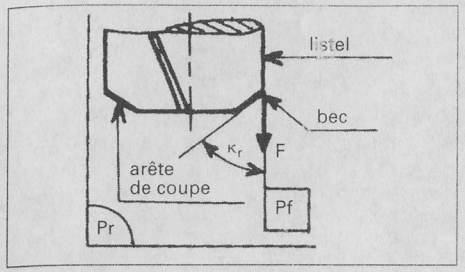


FIGURE 1.4
Arête de coupe principale des alésoirs.

Utilisation

Elle est spécifique à la conception de chaque type d'alésoir (forets-aléseurs, alésoirs d'ébauche, alésoirs de chaudronnerie, alésoirs-machine, alésoirs coniques).
Ils sont utilisés pour le calibrage des trous en dimension et en forme (cylindricité et rectitude) par un faible enlèvement de matière.
Les forets aléseurs et alésoirs ébaucheurs sont utilisés pour calibrer géométriquement des trous, en forme et position.
Alésoirs de trois à quatre dents.
Ils sont utilisés pour l'alésage de trous brut de fonderie ou de forge : calibrage particulièrement en cylindricité avec les listels hélicoïdaux.
Alésoirs ayant plus de quatre dents.
Ils sont utilisés pour l'alésage de trous percés : calibrage de précision, avec les listels droits (parallèles à l'axe du corps d'outil).
Forets-aléseurs.
Ils ont 3 ou 4 arêtes de coupe à denture hélicoïdale, hélice à droite (22°). Généralement leurs diamètres varient de 3 à 60 mm avec queue conique ou cylindrique selon les dimensions.
Ils sont utilisés en pré-alésage de trous bruts de fonderie et de forge pour corriger des défauts géométriques (circularité, désaxage, rectitude,...) (fig. 1.5). Éventuellement ils sont utilisés en finition (qualité 8).

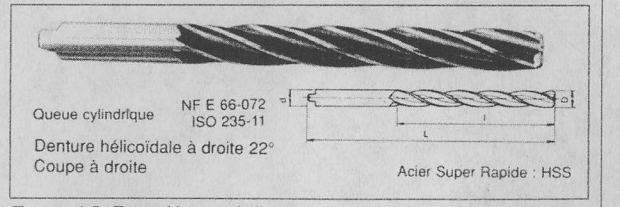


FIGURE 1.5 Foret aléseur trois lèvres. *Doc. Leclerc*

Alésoirs d'ébauche.
Ils ont 4 arêtes de coupe, à denture hélicoïdale, hélice à droite. Leurs diamètres varient généralement de 20 à 60 mm, avec alésage de maintien (fig. 1.6).
Ils sont utilisés en alésage de demi-finition pour corriger des défauts géométriques.
Alésoirs de chaudronnerie.
Ils ont 5 arêtes coupantes à denture hélicoïdale, hélice à droite avec une longue entrée conique (10 % sur 30 à 90 mm suivant les diamètres). Leurs diamètres

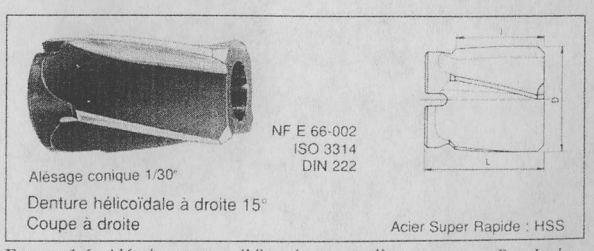


FIGURE 1.6 Alésoir « creux » d'ébauche, quatre lèvres. *Doc. Leclerc*

varient de 6 à 40 mm avec queue conique (fig. 1.7).
Ils sont utilisés en alésage de trous de tôlerie pour obtenir la cylindricité.

Alésoirs-machine.

Alésoirs-machine à denture droite.

Ils ont de 4 à 8 arêtes de coupe à denture droite avec queue cylindrique pour les diamètres 1 à 20 mm et queue conique pour les diamètres 6 à 50 mm (fig. 1.8).
Ils sont utilisés en alésage de finition de trous percés ou pré-alésés.

Alésoirs à denture hélicoïdales.

Ils ont de 3 à 12 arêtes de coupe à denture hélicoïdale à gauche (8°, 10°, 15°, 45°), en acier rapide ou en carbure (lames brasées).
Leurs diamètres varient de 1 à 50 mm, en plusieurs séries, soit :
Série d'alésoirs en palier de diamètre de 0.01 à 20 mm.
Ils sont à queue cylindrique ou conique (fig. 1.9 et 1.10).

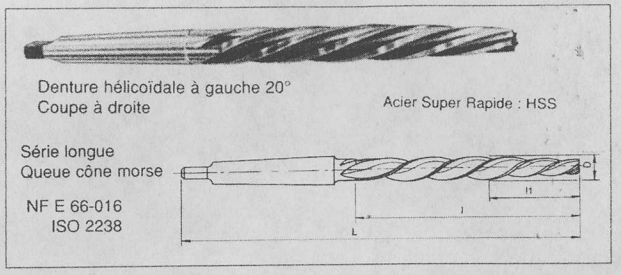


FIGURE 1.7 Alésoir de chaudronnerie cinq lèvres. *Doc. Leclerc*

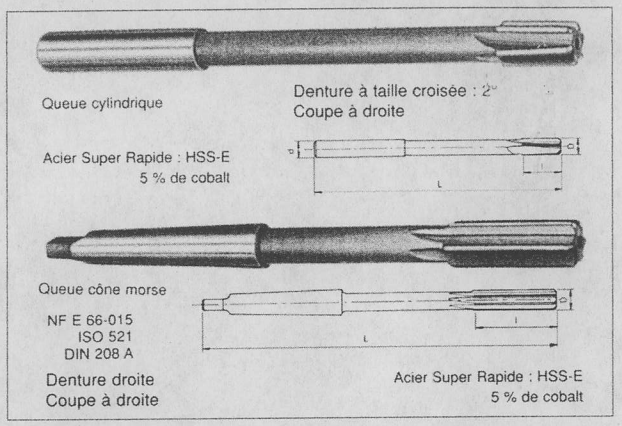


FIGURE 1.8 Alésoirs «machines». *Doc. Leclerc*

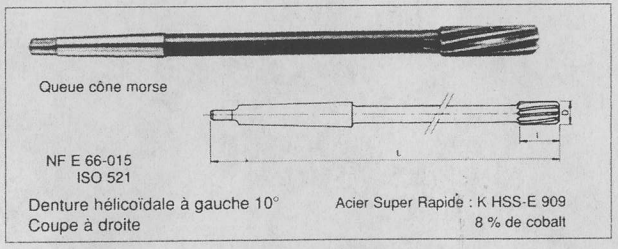


FIGURE 1.9 Alésoir «machine» par 0,01. *Doc. Leclerc*

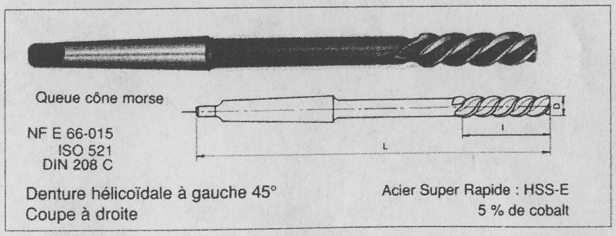


FIGURE 1.10 Alésoir «machine». *Doc. Leclerc*

Série denture longue : leurs diamètres varient de 6 mm (longueur utile de 47 mm), à 50 mm (longueur utile de 174 mm). Ils sont à queue conique (fig. 1.11).

Série d'alésoir extra- longs. Ils sont : à queue cylindrique du diamètre 3 mm avec une longueur utile de 90 mm, au diamètre 12 mm avec une longueur utile de 210 mm. (fig. 1.12) ; à queue conique, du diamètre 13 mm avec une longueur utile de 245 mm, au diamètre 50 mm avec une longueur utile de 415 mm.

Alésoirs expansibles

Ils sont à denture droite et à queue conique, des diamètres 6 à 32 mm.
Ils sont utilisés pour aléser à un diamètre supérieur au diamètre nominal (≅ 1%). (fig. 1.13).

Alésoirs «creux»

Ils sont avec alésage de maintien, de diamètres 20 à 60 mm, à denture droite en taille croisée (2 %) ou hélicoïdale à gauche (45°) (fig. 1.14).

Alésoirs coniques.

Ils sont de conicités correspondantes aux différentes utilisations, avec queue cylindrique ou conique, soit :
Alésoir pour dépouille des outillages (moules et matrices) de conicité 1 %. Ils sont à denture hélicoïdale (15°) à gauche avec 4 dents, de diamètres 1.25 à 6 mm. (fig. 1.15).

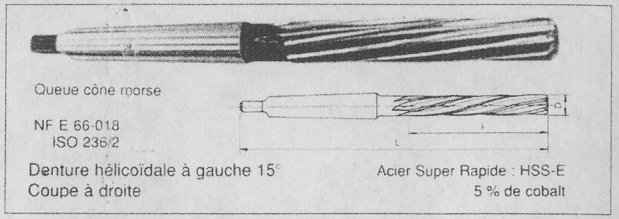


FIGURE 1.11 Alésoir denture longue. *Doc. Leclerc*

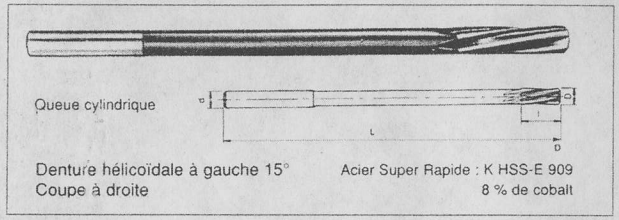


FIGURE 1.12 Alésoir extra-long. *Doc. Leclerc*

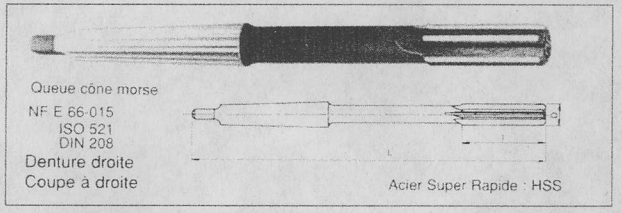


FIGURE 1.13 Alésoir expansible. *Doc. Leclerc*

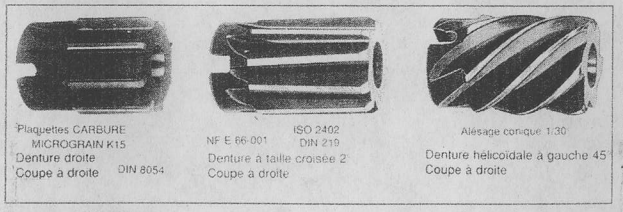


FIGURE 1.14 Alésoirs «creux» de finition. *Doc. Leclerc*

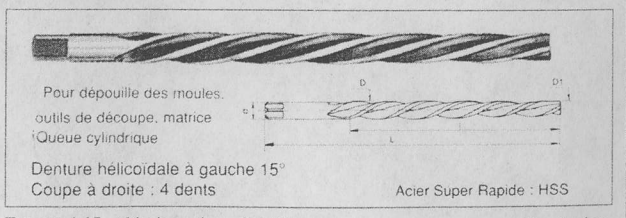


FIGURE 1.15 Alésoir conique d'outillage. *Doc. Leclerc*

Alésoirs pour buses d'injection, de conicité 5 % ou 10 %. Ils sont à denture hélicoïdale (45°) à gauche avec 2 dents, diamètres 6 à 20 mm (fig. 1.16).

Alésoir pour goupilles, de conicité 2 %. Ils sont à denture hélicoïdale à gauche (30°), de diamètres 5 à 30 mm, avec queue conique. (fig. 1.17).

Alésoirs pour cônes «Morse» de CM 0 à 5. Ils sont à denture hélicoïdale (60°) à gauche, avec queue conique (fig. 1.18).

Broches.

Elles sont utilisées sur brocheuses, pour travaux de grande série, en ébauche et finition avec le même outil dans le cycle (succession de dents d'ébauche et de finition).

(Voir chapitre «procédé de brochage»).

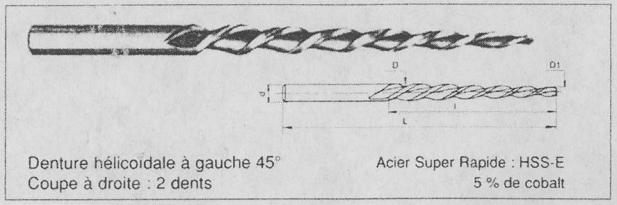


FIGURE 1.16 Alésoir conique pour moules d'injection. *Doc. Leclerc*

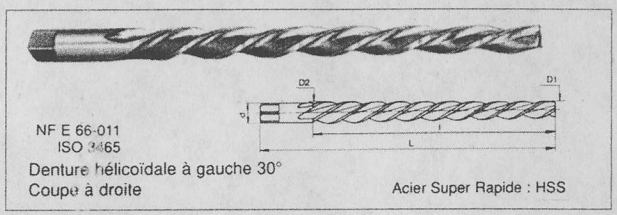


FIGURE 1.17 Alésoir conique pour goupilles. *Doc. Leclerc*

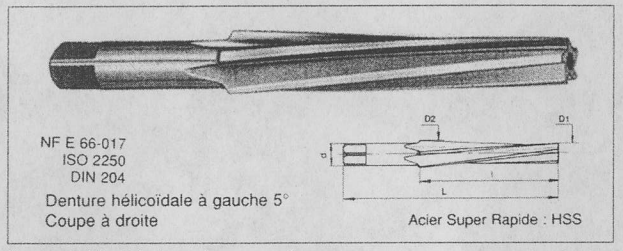


FIGURE 1.18 Alésoir conique pour cône morse. *Doc. Leclerc*

2.2 Outils d'enveloppe.

Ce sont les barres d'alésage, outils à aléser, fraises cylindriques deux tailles, têtes à aléser.

Barres d'alésage.

De conception monobloc ou modulaire courte, rallongée, antivibratoire. Elles supportent le ou les outils de coupe montés généralement en bout de barre, pour travail « en l'air » (fig. 1.19, 1.20, 1.21).

Les outils sont à plaquettes indexées, à cartouche porte-plaquette, à lames.

Le réglage diamètral s'effectue par excentration micrométrique de l'outil.

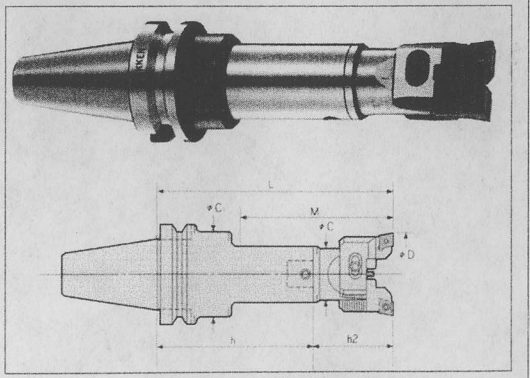
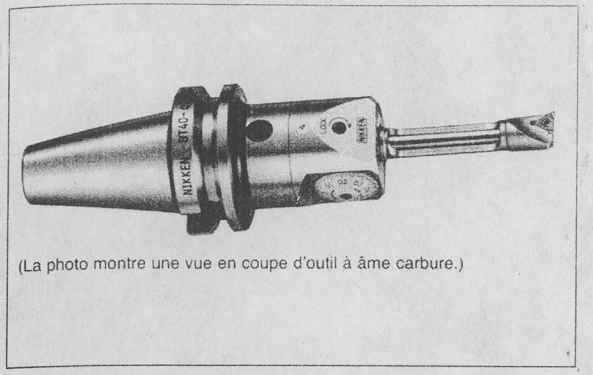


FIGURE 1.19 Barre d'alésage d'ébauche «Balance-cut».
Doc. Nikken



(La photo montre une vue en coupe d'outil à âme carbure.)

FIGURE 1.20
Barre d'alésage à réglage micrométrique, avec outil à âme carbure interchangeable.
Doc. Nikken

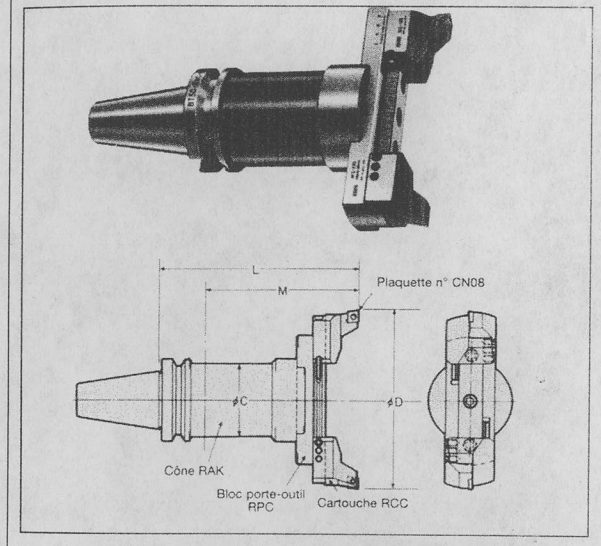


FIGURE 1.21
Barre d'alésage pour grands diamètres (avec vis de réglage de précision).
Doc. Nikken

Utilisation. Sur aléseuses, fraiseuses, centres d'usinage, tours, centres de tournage, avec des plages de diamètres pour chaque barre d'alésage, en ébauche et en finition.

Outils à aléser.

Ils sont utilisés sur tours et centres de tournage, en ébauche et finition de tous diamètres (voir chapitre «procédé de tournage»).

Fraises cylindriques «deux tailles».

Elles sont utilisées sur machines à commande numérique essentiellement (fraiseuses, centres d'usinage, centres de tournage, aléseuses) en ébauche et finition de tous diamètres et de longueur limitée à celle des arêtes de coupe.

Têtes à aléser.

Elles sont utilisées sur aléseuses, fraiseuses, centres d'usinage, en ébauche et finition d'alésages de faible profondeur et de grands diamètres (≅ 800 mm maxi), ainsi que des surfaçages concentriques.

Meules.

Elles sont utilisées sur rectifieuses, pour des travaux de grande précision (dimensionnelle et état de surface) d'alésages de petites à moyennes dimensions sur pièces cylindriques. (Voir chapitre «procédés de rectification»).

2.3 Choix d'utilisation des outils d'alésage

Alésoirs (outils de forme).

Outils monoblocs multi-arêtes de coupe utilisés pour alésage en finition de trous préalablement ébauchés (diamètres 3 à 60 mm), généralement.
Les forets-aléseurs sont à utiliser en alésage d'ébauche.

Barres d'alésage (outils d'enveloppe).

À plaquette de coupe fixée dans une cartouche installée sur la barre support. (fig. 1.21).
Capacités diamètrales : Jusqu'au diamètre 500 mm, et au delà avec un appareillage.
À lame d'alésage : elles peuvent équiper des barres pour effectuer des alésages spécifiques (pièce unitaire,...).
Barres d'alésage courtes : elles travaillent «en l'air». À utiliser sur fraiseuses à CN, centres d'usinage et aléseuses pour l'alésage des pièces mécaniques en général ; conception en longueur modulaire (fig. 1.22).
Opposition aux efforts de flexion durant la coupe : choisir un diamètre maximum de barre.

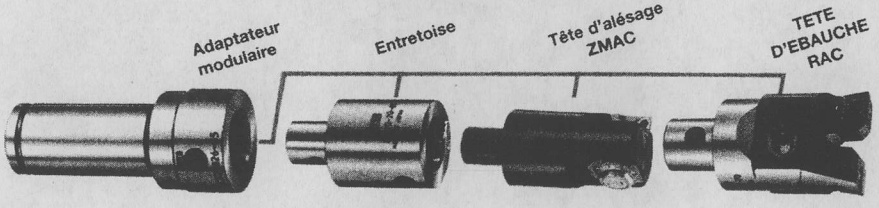
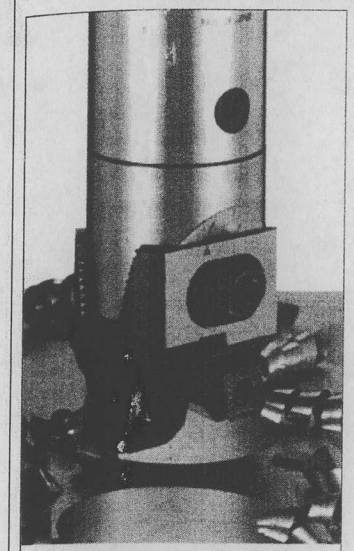


FIGURE 1.22 Barre d'alésage modulaire (à queue cylindrique). *Doc. Nikken*

Barre rallongée. Choisir une barre antivibratile qui absorbe les vibrations dues à la coupe.
Deux outils montés en opposition sur une barre d'alésage assure l'équilibrage des efforts de coupe (alésage d'ébauche) (fig. 1.23).
Barres d'alésage longues. À soutenir à leur extrémité par une lunette fixe : usinage de longs alésages et d'alésages en ligne (fig. 1.24).



- Vitesse de coupe 150 m/min
- Avance 0,4 à 0,6 mm
- Matière usinée 6 à 10 mm (au diamètre)
- Diamètre d'alésage 60 mm
- Matériau SNCM420

FIGURE 1.23
Exemple d'alésage à la barre «Balance-cut» à 2 plaquettes carbure
Doc. Nikken

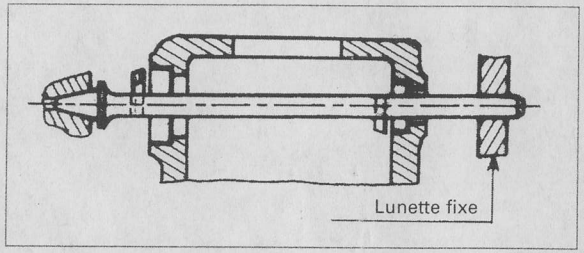


FIGURE 1.24 Schéma d'usinage de 2 alésage avec barre d'alésage longue.

Fraises deux tailles (outils d'enveloppe).

Elles sont utilisées en cycle de contournage (avec une commande numérique) : usinage de tous diamètres dans les limites de la machine utilisée (fig. 1.25). La cylindricité de la fraise est impérative pour obtenir la cylindricité de l'alésage.

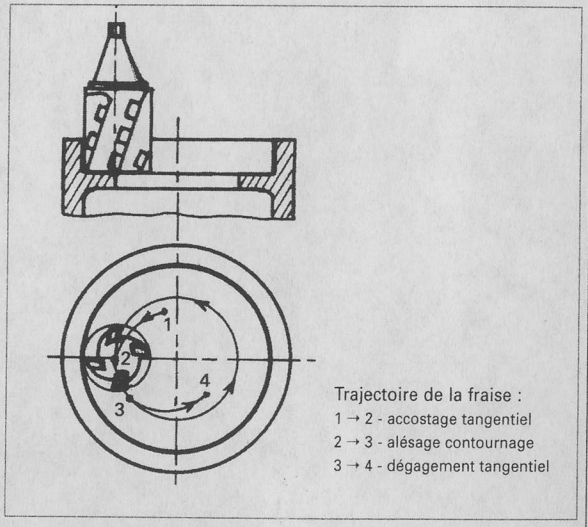


FIGURE 1.25 Cycle d'alésage-contournage à la fraise cylindrique 2 tailles.

3. Alésage à l'outil de forme

3.1 Surépaisseur d'usinage

Elles ne seront pas inférieures aux recommandations des fabricants : Pas de frottements des arêtes de coupe sur la surface à aléser, ce qui provoquerait une abrasion et l'usure accélérée des arêtes avec altération de l'état de surface du trou.

Mécanique de précision courante

Surépaisseur de 0.05 à 0,60 mm pour les diamètres de 5 à 60 mm, en qualité H7 (fig. 1.26).

Ébauche au foret-aléseur et à l'alésoir d'ébauche.

Surépaisseur de 0.50 à 6 mm pour les diamètres de 5 à 60 mm, en correction de trous bruts de forgeage et moulage.

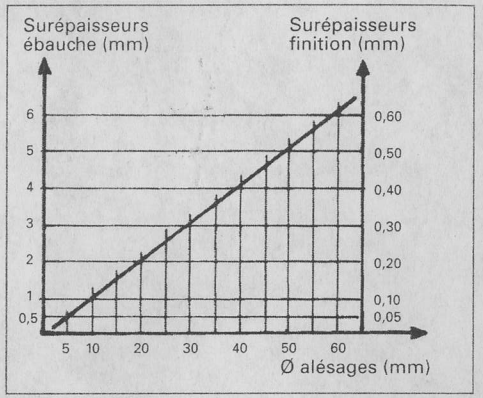


FIGURE 1.26
Surépaisseurs d'alésage recommandées selon les diamètres à obtenir

3.2 Évacuation des copeaux

L'angle d'hélice des listels (arêtes secondaires) dirigent sensiblement les copeaux (fig. 1.27).

Angle d'hélice positif : pour l'alésage des trous borgnes, les copeaux se dégageant vers l'entrée de l'alésage.

Angle d'hélice négatif : pour l'alésage des trous débouchants, les copeaux se dégageant vers le fond de l'alésage.

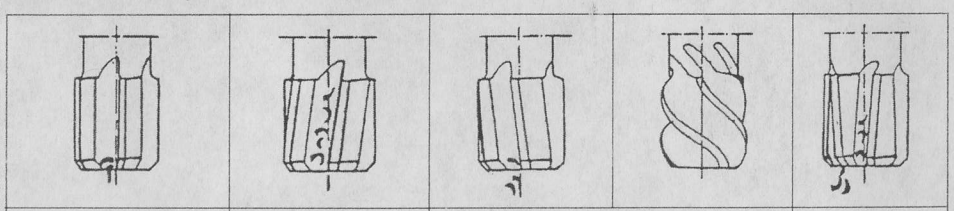


FIGURE 1.27 Sens d'évacuation des copeaux selon le type d'alésoir.

Doc. Leclerc

3.3 Conditions de coupe des alésoirs

Vitesses de coupe.

Elles sont relativement basses en alésage avec alésoirs monoblocs pour ne pas détruire prématurément les arêtes secondaires.

Outils en acier rapide et en carbure de 4 à 45 m/mm selon les matériaux usinés. (fig. 1.28 et 1.29).

Matières à usiner	Vitesses de coupe m/mn	Avances en mm par tour suivant diamètres Jusqu'à Ø 8	Ø10 à 20	Ø 25 à 40	Ø 50 et plus	Lubrifiants
Aciers jusqu'à 50 daN / mm².....	10 à 15	0,1 à 0,12	0,15 à 0,25	0,25 à 0,35	0,35 à 0,4	Huile soluble - Huile de colza
Aciers de 50 à 70 daN / mm².....	8 à 10	0,1 à 0,12	0,15 à 0,25	0,25 à 0,35	0,35 à 0,4	Huile soluble - Huile de colza
Aciers de 70 à 90 daN / mm².....	6 à 8	0,1 à 0,12	0,15 à 0,25	0,25 à 0,35	0,35 à 0,4	Huile soluble - Huile de colza
Aciers de plus de 90 daN / mm².....	4 à 6	0,08 à 0,1	0,1 à 0,2	0,2 à 0,3	0,3 à 0,4	Huile soluble - Huile de colza
Fonte malléable < 160 HB.....	8 à 12	0,15 à 0,2	0,2 à 0,3	0,3 à 0,4	0,35 à 0,45	A sec
Fonte dure > 200 HB.....	4 à 6	0,12 à 0,15	0,15 à 0,25	0,25 à 0,35	0,3 à 0,4	A sec
Laitons.....	15 à 20	0,15 à 0,25	0,3 à 0,4	0,4 à 0,5	0,5 à 0,6	Huile de colza - A sec
Bronze.....	6 à 12	0,1 à 0,2	0,2 à 0,3	0,3 à 0,45	0,5 à 0,6	Huile de colza - A sec
Cuivre.....	10 à 18	0,12 à 0,18	0,15 à 0,25	0,3 à 0,4	0,35 à 0,45	Huile de colza - A sec - Huile soluble
Alliages légers.....	30 à 45	0,12 à 0,18	0,2 à 0,25	0,3 à 0,4	0,4 à 0,5	Pétrole - Térébenthine - Huile soluble
Matières plastiques tendres.....	6 à 10	0,15 à 0,3	0,3 à 0,4	0,4 à 0,6	0,5 à 0,6	A sec
Matières plastiques dures.....	4 à 6	0,15 à 0,25	0,25 à 0,35	0,3 à 0,45	0,4 à 0,5	A sec - Air comprimé
Aciers inoxydables.....	4 à 6	0,05 à 0,08	0,1 à 0,18	0,15 à 0,25	0,25 à 0,3	Huile soluble – Huile de colza

FIGURE 1.28 Conditions de coupe des alésoirs en ARS. *Doc. Leclerc*

Matières à usiner	Vitesses de coupe m/mn	Avances en mm par tour suivant diamètres jusqu'à Ø 8	Ø 10 à 20	Ø 25 à 40	Ø 50 et plus	Lubrifiants
Aciers jusqu'à 70 daN/mm²	10 à 15	0,15 à 0,18	0,2 à 0,3	0,3 à 0,4	0,4 à 0,5	Huile soluble - Huile de colza
Aciers de 70 à 100 daN/mm²	8 à 12	0,15 à 0,18	0,2 à 0,3	0,3 à 0,4	0,4 à 0,5	Huile soluble - Huile de colza
Aciers de 100 à 140 daN/mm²	6 à 10	0,12 à 0,15	0,15 à 0,2	0,2 à 0,3	0,3 à 0,4	Huile soluble - Huile de colza
Fonte malléable < 160 HB	8 à 12	0,15 à 0,18	0,2 à 0,3	0,3 à 0,4	0,4 à 0,5	A sec
Fonte grise < 200 HB	8 à 15	0,2 à 0,3	0,3 à 0,4	0,4 à 0,5	0,5 à 0,6	A sec
Fonte grise > 200 HB	6 à 12	0,15 à 0,18	0,2 à 0,3	0,3 à 0,4	0,4 à 0,5	A sec
Laitons	15 à 30	0,2 à 0,25	0,25 à 0,35	0,4 à 0,5	0,5 à 0,6	Huile de colza - A sec
Bronze	15 à 30	0,2 à 0,25	0,25 à 0,35	0,4 à 0,5	0,5 à 0,6	Huile de colza - A sec
Cuivre	20 à 40	0,25 à 0,3	0,35 à 0,5	0,5 à 0,6	0,6 à 0,7	Huile de colza - A sec - Huile soluble
Alliages légers	15 à 40	0,2 à 0,25	0,3 à 0,4	0,4 à 0,5	0,5 à 0,6	Pétrole - Térébenthine - Huile soluble
Matières plastiques	15 à 30	0,25 à 0,3	0,35 à 0,5	0,5 à 0,6	0,6 à 0,7	A sec

FIGURE 1.29 Conditions de coupe des alésoirs en carbure. *Doc. Leclerc*

Vitesses d'avance.

Elles sont relativement grandes, évitant la coupe en dessous du copeau minimum. Selon le matériau à usiner, et le diamètre de l'alésoir, l'avance varie de 0.05 à 0,70 mm/tour. (fig. 1.28 et 1.29).

Pour les alésoirs recouverts TIN, doubler les vitesses de coupe et d'avance.

3.4 Alésage à l'alésoir monobloc

Les alésoirs monoblocs, en acier rapide et en carbure, conviennent pour l'alésage de l'ensemble des matériaux.

Carbure revêtu TIN.

Outre les vitesses de coupe et d'avance doublées, on obtient :
Diminution de l'usure des arêtes de coupe et des listels (résistance à l'abrasion).
Diminution du collage de copeaux : obtention d'un excellent état de surface.
Utilisation : en particulier pour l'alésage de matériaux à risque de grippage (acier inoxydables,...).

Dégagement d'outil

Remontée du fond de l'alésage, en avance travail et sans inversion de la rotation pour ne pas détériorer les listels (fig. 1.30).

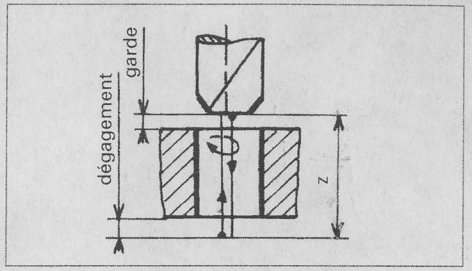


FIGURE 1.30
Schéma de cycle fixe d'alésage à l'alésoir pour MOCN.

4. Alésage à la barre

4.1 Généralités

Utilisation en ébauche et finition d'alésage brut (moulage, forgeage) ou percés.
Les angles d'utilisation de l'outil d'alésage sur barre K_r et λ_s (fig. 1.31) influent fortement sur l'usinage.

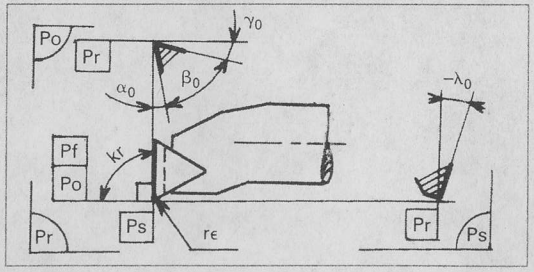


FIGURE 1.31
Angles de l'utilisateur des outils d'alésage.

Angle de direction d'arête Kr

Angles limites de 75° à 95° avec le choix préférentiel de 90° pour annuler l'effort de flexion sous la force radiale : L'outil, travaillant généralement en bout, est sensible aux vibrations.

Angle d'inclinaison d'arête λ_s négatif.

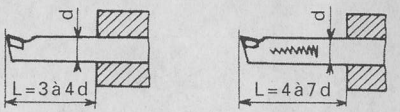
Cet angle négatif permet l'attaque progressive de l'arête de coupe protégeant le bec (r_ϵ).
À utiliser en particulier en coupe discontinue.

État de surface

Pour obtenir une excellente qualité (alésage de finition) choisir : un rayon de bec r_ϵ le plus petit possible (≅ 0,2 mm) ; un angle de coupe à 8° positif ; un matériau carbure ou acier rapide (de préférence au carbure revêtu dont l'arête est moins vive).

Cylindricité des alésages

Choisir : le plus grand diamètre de barre admissible ; un porte-à-faux le plus réduit possible avec maintien de la barre efficace et rigide (fig. 1.32).

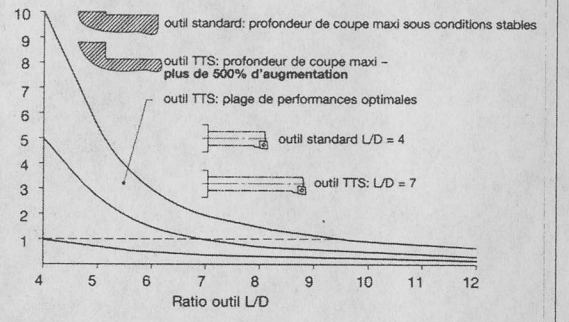


Barre standard — Barre antivibratoire

FIGURE 1.32
Longueur utile des barres d'alésage.

Porte-à-faux maximum

On admet pour les cas généraux d'utilisation et selon le type de barre, une longueur en porte à faux de :
3 à 4 fois le diamètre des barres simples ;
4 à 7 fois le diamètre des barres antivibratoires (et non inférieur au minimum proposé par le constructeur).
7 à 10 fois le diamètre des barres antivibratoires, version longue.



Stabilité de l'outil après réglage (système TTS) *Doc Kennametal Hertel*

Lubrification

En production de série, elle s'effectue sous-pression par le centre de la barre (à proximité de l'arête de coupe), permettant une amélioration de l'état de surface par : la réfrigération de l'arête de coupe et l'évacuation des copeaux du fond de trou (les rayures provoquées par copeaux sont évitées). (fig. 1.33, fig. 1.28, fig. 1.29).

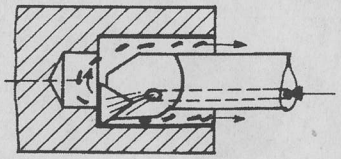


FIGURE 1.33 Schéma de barre d'alésage avec lubrification par son centre.

Cycle d'alésage

À utiliser en alésage avec barre équipée d'un seul outil.
L'outil ne devant pas rayer l'alésage au retour, ce cycle (de CN) provoque : rotation broche et avance travail ; arrêt indexé broche et dégagement de l'outil (qq mm. de l'alésage) ; retour rapide de la barre.

Nota. La barre est placée dans la broche, avec l'outil grain en Y positif.

Alésages très longs ou en ligne

Ils sont réalisés avec des barres d'alésage soutenues à leur extrémité par une lunette fixe (opposition à la flexion) (fig. 1.24).

Outils associés sur barre.

Deux outils travaillant en opposition (avec $K_r = 90°$), éliminent les efforts radiaux qui provoqueraient une flexion de barre (fig. 1.23).

4.2 Barres d'alésage à outils réglables

Utiliser des cartouches porte-outil à réglage micrométrique : assurent précision et flexibilité diamétrale des alésages.

Cartouche micrométrique.

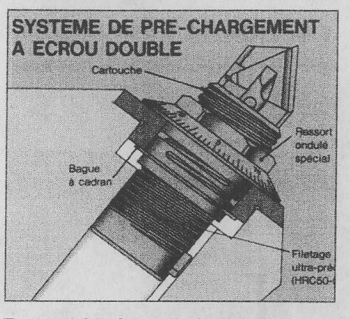


FIGURE 1.34 Cartouche à réglage micrométrique. *Doc. Nikken*

D'une flexibilité diamétrale de 2.5 à 10 mm pour diamètres de 26 à 90 mm.
Elle supporte la plaquette de coupe (carbure, revêtue, cermet).
Sa position dans son logement en bout de barre est perpendiculaire, parallèle ou inclinée sur l'axe (fig. 1.34 et 1.35).
La position inclinée inverse permet de dresser la face arrière d'un alésage, sur MOCN, en cycle automatique (fig. 1.36 et 1.37).

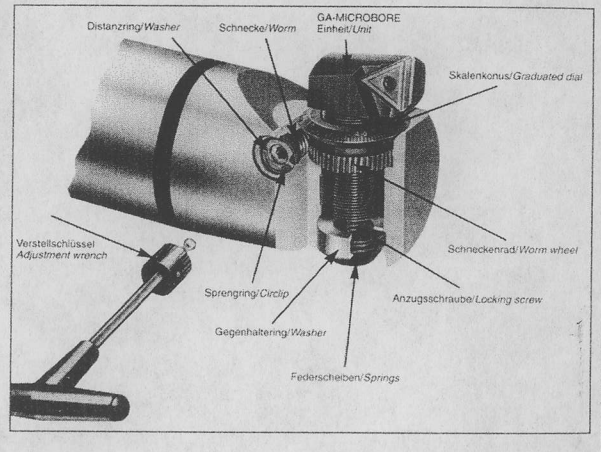


FIGURE 1.35 Cartouche à réglage micrométrique. *Doc. Gildemeister-Devlieg*

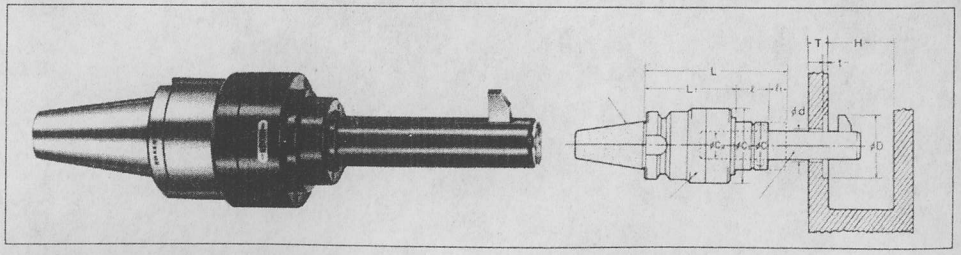


FIGURE 1.36 Appareil à lamer en tirant. *Doc. Nikken*

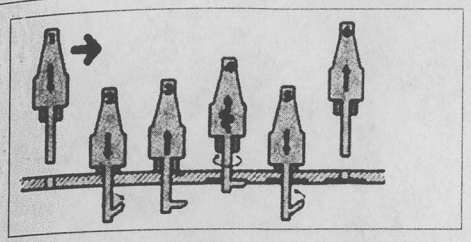


FIGURE 1.37 Cycle d'utilisation de l'outil à lamer en tirant. *Doc. Nikken*

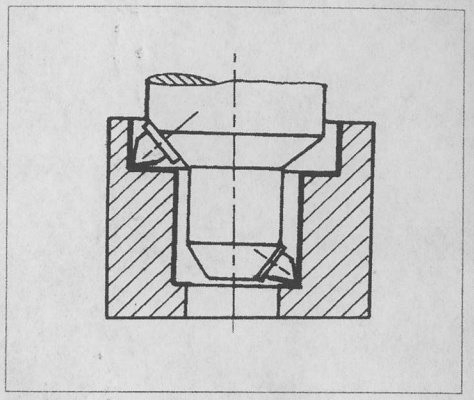


FIGURE 1.38 Schéma de cartouches micrométriques groupées sur une barre d'alésage.

Barres à plusieurs cartouches.

- Utilisées pour l'obtention simultanée de plusieurs alésages, en travaux de série (fig. 1.38).
- Barres à 3 outils en ébauche et en finition de moyenne à grande capacité : améliore productivité et stabilité de la barre (fig. 1.39).

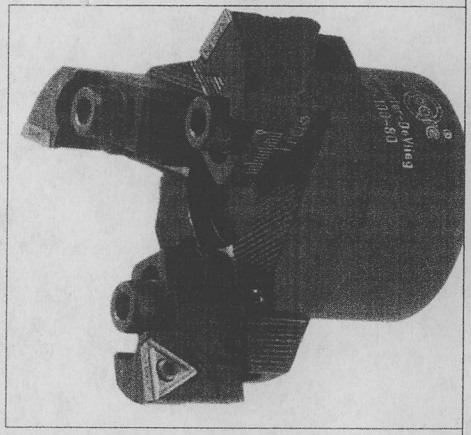


FIGURE 1.39 Tête d'alésage tribore *Doc. Gildemeister-Devlieg*

Modules porte-plaquette en bout de barre.

Plusieurs cartouches peuvent équiper une barre (courte, longue, antivibratoire) selon les outils à utiliser (fig. 1.40) : mise en œuvre rapide et réduction de l'outillage.

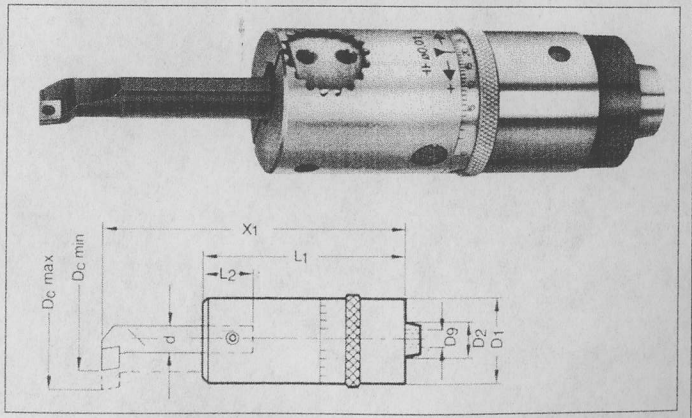


FIGURE 1.40 Outil d'alésage de finition «Novex» pour petit diamètres. *Doc Walter*

Modules porte-plaquette de précision.

À réglage micrométrique (sans modification de cote de longueur) : Précision de réglage inférieur à 0,01 mm.
Avec lubrification par le corps d'outil.
Changement rapide d'outils préréglés pour diamètre de 10 à 500 mm, longueur 80 à 200 mm, avec des plages de diamètres : 10 à 28 mm, longueur 30 mm (outil à aléser) (fig. 1.41) ; 26.5 à 165 mm (réglage diamétral de 6.4 à 44 mm) ; 150 à 500 mm (réglage diamétral de 30 à 55 mm) (fig. 1.42).

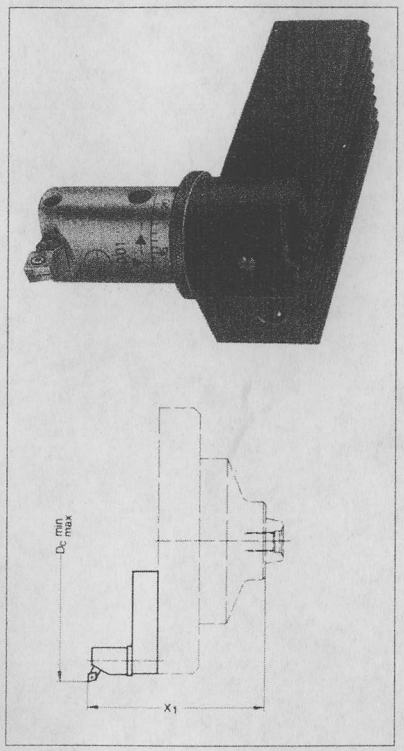
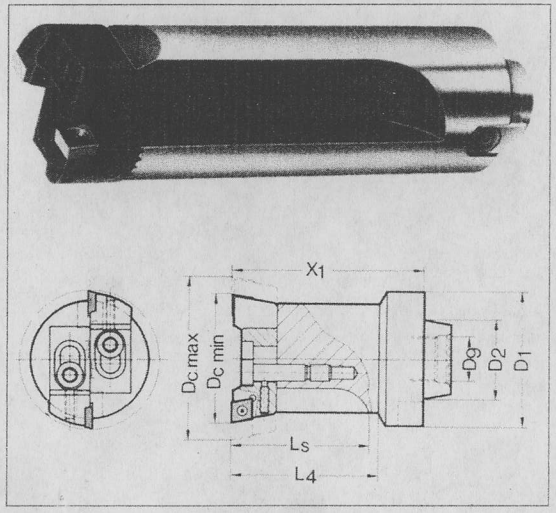


FIGURE 1.41
Tête d'alésage «Novex» micrométrique avec support pour grands diamètres.
Doc. Walter

FIGURE 1.42
Tête d'alésage à deux tranchants «Novex» modulaire
Doc. Walter.



Barres d'alésage à deux modules porte-plaquette réglables diamétralement.

Alésage ébauche des diamètres de 25 à 580 mm, longueurs modulables avec grandes plages de réglage selon capacité (fig. 1.43).

Têtes d'alésage à deux modules porte-plaquette réglables.

Alésage ébauche de grands diamètres : 135 à 500 mm avec plages de réglage 45 à 50 mm longueur 100 à 140 mm. (fig. 1.44).

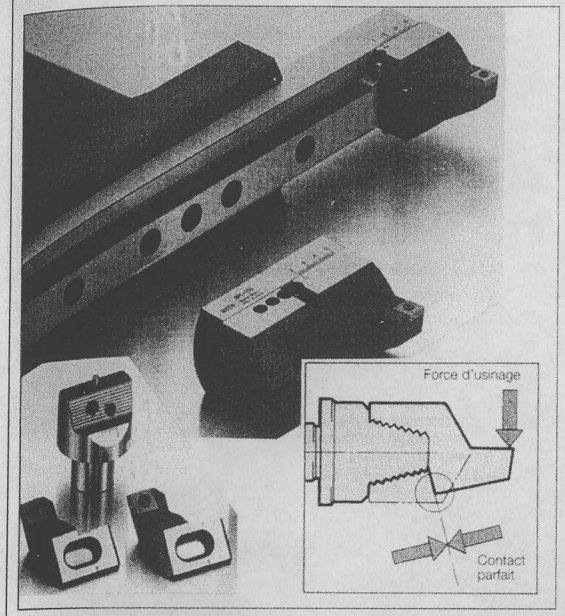


FIGURE 1.43
Barre d'alésage «Balance-Cut» à cartouche avec contact d'appui par épaulement.
Doc. Nikken

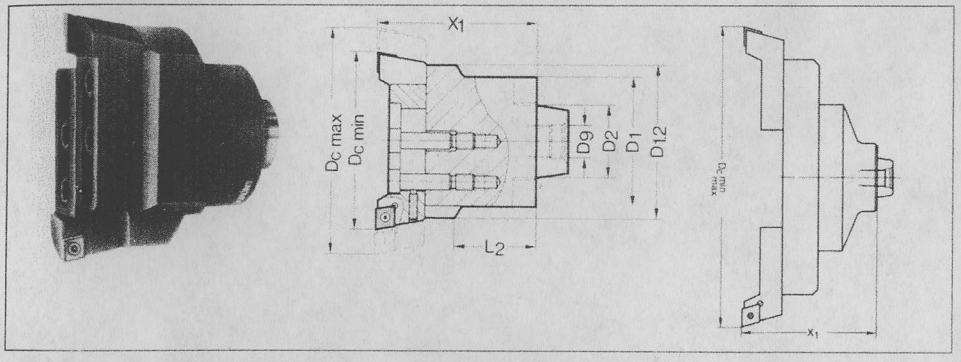


FIGURE 1.44
Tête d'alésage à deux cartouches porte-plaquette réglables «Novex».
Doc. Walter.

4.3 Barres d'alésage multi-outils

Outils spécifiques pour une opération d'alésage en grande série : usinage simultané d'alésages coaxiaux (fig. 1.45). Groupe de cartouches porte-outils interchangeables, avec réglage fin diamétralement.

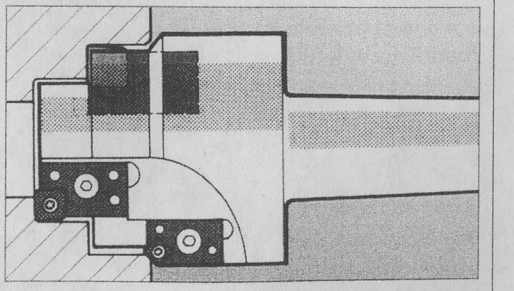


FIGURE 1.45
Barre d'alésage multi-outils
Doc. Walter

4.4 Lames d'alésage sur barre

Avec une ou deux lames en bout de barre.
Usinage en ébauche et finition d'alésages, de capacité standard 25.4 à 180 mm.
Utilisés en travaux de petite série à unitaire (fig. 1.46).

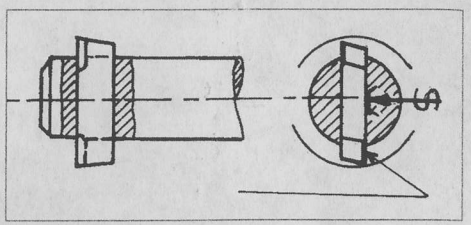


FIGURE 1.46 Schéma de barre d'alésage avec lame.

4.5 Têtes à aléser et surfacer

Usinage, avec un seul porte-outil, dans une grande plage de diamètres pour : alésages concentriques, surfaçage avant et arrière, fonçage de gorges, tourillonnage, éventuellement filetage et perçage.
Utilisés en travaux unitaire et petites séries, avec un équipement modulaire des outils et de leurs supports. Capacités diamétrales de 250 à 1100 mm. (avec rallonges support d'outil) longueur 100 à 390 mm. (fig. 1.47).
Les mouvements d'avance sont automatiques (à CN).

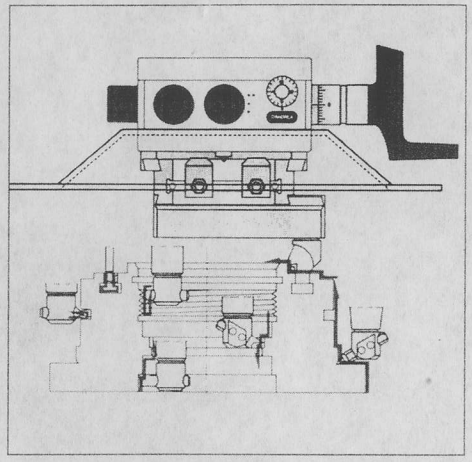


FIGURE 1.47
Tête à aléser multi-opérations.
Doc. Andrea

4.6 Conditions de coupe des barres d'alésage

Vitesse de coupe.

Finition et ébauche (à la barre d'alésage) : 80 à 250 m/min (plaquettes en carbure) selon les matériaux et les longueurs à usiner (fig. 1.48).

Vitesses d'avance

Finition (à la barre d'alésage) de 0.05 à 0,15 mm/tour, selon les longueurs à usiner.
Ébauche de 0.15 à 0,60 mm/tour, selon diamètres et longueurs à usiner (fig. 1.48).

Choix des conditions de coupe à la barre d'alésage.

Plus la longueur et le diamètre à usiner sont grands, plus la vitesse de coupe et l'avance le sont aussi (dans les limites données).

Matières	Diamètres d'alésage (mm)	Vitesses de coupe (m/min)	Avance (mm/tour)	
			Ébauche	Finition
Aciers (non alliés, alliés, de cémentation)	Ø < 20	80 à 100	0,10 à 0,20	0,05 à 0,15
	20 à 30	90 à 120	0,20 à 0,35	0,05 à 0,15
	30 à 45	120 à 140	0,20 à 0,45	0,05 à 0,15
	45 à 60	120 à 140	0,30 à 0,50	0,06 à 0,15
	60 à 80	120 à 140	0,40 à 0,60	0,08 à 0,15
	80 à 120	120 à 140	0,40 à 0,60	0,08 à 0,15
	Ø > 120	120 à 140	0,40 à 0,60	0,10 à 0,20
Fontes (malléable, grise, GS)	Ø < 20	60 à 120	0,10 à 0,20	0,05 à 0,15
	20 à 30	60 à 120	0,15 à 0,30	0,05 à 0,15
	30 à 45	60 à 120	0,20 à 0,40	0,05 à 0,15
Alliages de bronze et de laiton	45 à 60	60 à 120	0,20 à 0,40	0,05 à 0,15
	60 à 80	60 à 120	0,20 à 0,45	0,05 à 0,20
	80 à 120	60 à 120	0,20 à 0,45	0,05 à 0,20
	Ø > 120	60 à 120	0,20 à 0,45	0,05 à 0,20
Alliages d'aluminium	Ø < 20	100 à 140	0,10 à 0,20	0,05 à 0,15
	20 à 30	130 à 160	0,15 à 0,30	0,05 à 0,15
	30 à 45	180 à 220	0,30 à 0,40	0,05 à 0,15
	45 à 60	180 à 220	0,40 à 0,50	0,05 à 0,15
	60 à 80	200 à 250	0,40 à 0,60	0,05 à 0,20
	Ø > 80	200 à 250	0,40 à 0,60	0,05 à 0,20

FIGURE 1.48 Conditions de coupe et d'avance des barres d'alésage avec outils carbure. (Ordre de grandeur).

4.7 Système automatique d'alésage de précision

Système intégrable à la plupart des machines d'usinage *«Sandvik autocomp»* (fig. 1.49).
Obtention d'alésages de qualité avec répétabilité, (semi-finition et finition en cycle automatique) : une jauge de mesure détecte la dimension de l'alésage usiné et adresse l'information à un moniteur de commande pour ordre de correction dimensionnelle agissant sur la barre d'alésage déformante.

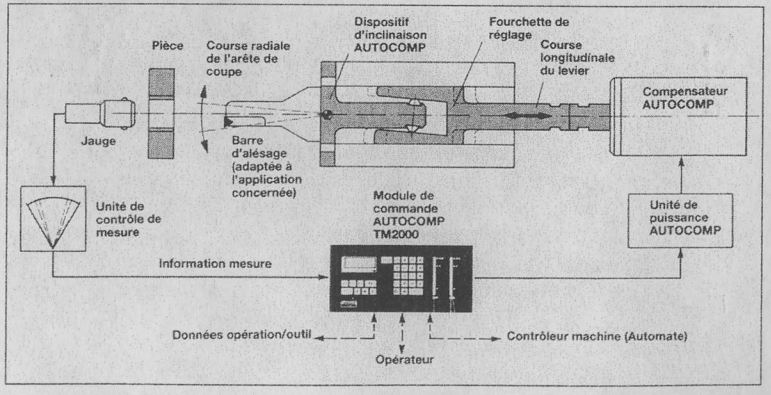


FIGURE 1.49 Schéma de principe du système de mesure «Autocomp» relié à une barre d'alésage.
Doc. Sandvik-Coromant

4.8 Têtes d'alésage de forme

Usinage de formes axiles en intérieur et extérieur avec un outil d'enveloppe travaillant par tourbillonnement (fig. 1.50).
Têtes d'alésage *«formbore»* pour tours à CN, centres de tournage, aléseuses à CN, fraiseuses à CN, centres d'usinage (fig. 1.51).
Utilisation en travaux unitaires et petites séries de formes débouchantes ou non de faible profondeur, avec précision de positionnement du profil usiné et de sa profondeur.

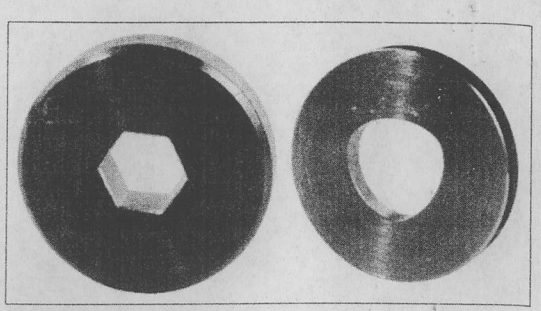


FIGURE 1.50 Exemples de formes obtenues avec une tête d'alésage «Formbore»
Doc. Gildemeister-Devlieg

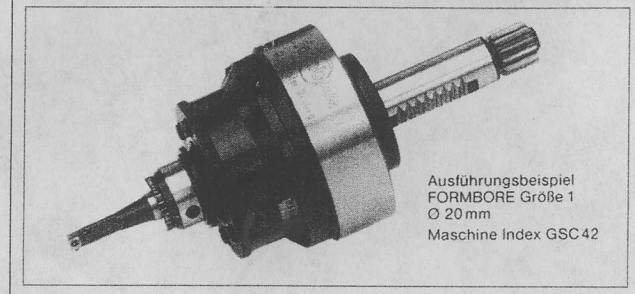


FIGURE 1.51 Tête d'alésage de forme «Formbore»
Doc. Gildemeister-Devlieg

5. Alésage à la fraise

Obtention d'alésages en contournage de profil circulaire sur machines à CN avec fraise cylindrique deux tailles, à l'aide d'un cycle fixe de fraisage, à partir d'un alésage brut.
Le cycle fixe de fraisage circulaire provoque l'alésage avec accostage et le dégagement tangentiels à la surface usinée (alésage réalisé sans marquage de l'outil) (fig. 1.25).
Précision obtenue. Couramment de qualité 7, la fraise étant parfaitement cylindrique.
Limite de longueur des alésages : celle de la longueur des arêtes de coupe de fraise.
Utilisation. En alésage ébauche - et finition - des pièces à parois (carters) obtenue par moulage, forgeage, mécano-soudure (trous bruts obtenus avec la pièce).
Les alésages sont réalisables débouchants ou avec épaulement (hauteur maxi donnée par la fraise). Les épaulements (alésage et dressage) sont obtenus simultanément.
Le diamètre du trou brut doit être supérieur à celui de la fraise (qui coupe uniquement en périphérie).
Conditions de coupe. Celles du fraisage (voir chapitre «procédé de fraisage»).
Obtention de surfaces concentriques aux alésages (gorges, chanfreins, rainures de circlips de tous diamètres) avec fraises de forme au profil correspondant, en cycle fixe de fraisage circulaire.

6. Mise en œuvre

6.1 Puissance de coupe

La puissance disponible à la broche des différentes machines-outils employées est généralement suffisante (faible surépaisseur d'usinage), sauf éventuellement en alésage d'ébauche, avec outils d'enveloppe (fraises, barres d'alésage).

Barres d'alésage

Utiliser la formule pour tournage :

$$P_u = K_a . f . s . V_c / 60 . \eta$$

(voir chapitre «procédés de tournage»).

Fraises deux tailles.

Utiliser la formule pour le fraisage :

$$P_u = s . l . n . z . F_z . K_a / 6120 . \eta$$

(voir chapitre «procédés de fraisage»).

6.2 Outillage porte-pièce(s)

Identiques à ceux utilisés en fraisage, sur fraiseuses et centres d'usinage, aux conditions essentielles :
– non déformation des pièces sous les actions de fixation et de coupe.
– accessibilité à un maximum de faces à usiner (fig. 1.52) ; (voir chapitre «procédés de fraisage»).

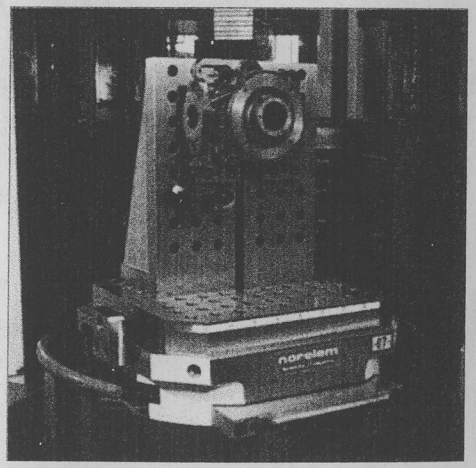


FIGURE 1.52
Porte-pièce modulaire sur équerre.
Doc. Norelem

Rappel (fraisage)

Pièces volumineuses. À maintenir en position par des éléments modulaires simples (brides, chandelles, cales, butées,...) avec des appuis complémentaires à l'isostatisme, évitant des déformations possibles sous les efforts de coupe.
Pièces de dimensions moyennes (≅ 800 mm maxi au cube). Maintenir en montages modulaires standards (optimisation de l'outillage).
Pièces de petites dimensions. À groupes en panoplie dans un porte-pièce.

6.3 Machines

Machines à broche verticale (perceuses, centres d'usinage,...)

Pour usiner des pièces comportant des alésages de petits diamètres (obtenus par perçage et alésage à l'alésoir) :
Les opérations d'alésage sont à grouper dans la phase avec les autres opérations (fraisage, perçage, tournage,...) sur les machines-outils utilisées (capacités palettes ≅ 500 au cube maxi ; table ≅ 1 000 x 500 mm) (voir chapitre «procédés de fraisage»).

Centres d'usinage à broche horizontale

Pour usinage de pièces de ≅ 200 à 1 000 au cube (selon les capacités - machine) avec accès à un maximum de faces sur la pièce, (axe d'indexage palette). (fig. 1.53).

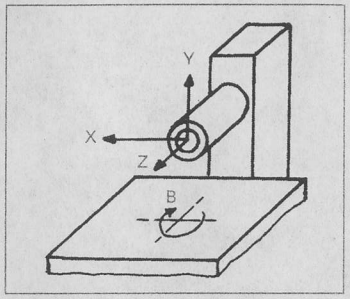


FIGURE 1.53
Schéma d'un centre d'usinage
4 axes X, Y, Z; B, broche horizontale.

Aléseuses de grande capacité.

Machine à table fixe (poids important des pièces : plusieurs tonnes).
Les axes numérisés sont affectés à l'ensemble banc - montant - chariot porte-broche, assurant l'accès à un maximum de surfaces sur la pièce en position fixe.

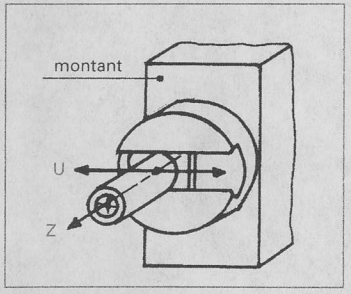


FIGURE 1.54
Schéma d'un coulisseau radial d'aléseuse
à broche horizontale.

Usinage des pièces très volumineuses.

Utiliser des aléseuses-fraiseuses à broche horizontale, ayant un maximum de flexibilité, obtenu par : un coulisseau à déplacement radial, permettant le surfaçage de grands diamètres, (fig. 1.54) ; un maximum d'axes numérisés (5 minimum) ; éventuellement, deux broches en parallèles : une broche de puissance (opérations de surfaçage très importantes) et une broche de vitesse (autres opérations : perçage, alésage, fraisage) ; un fourreau de broche mobile : pour l'accès d'outils aux surfaces éloignées du nez de broche (fig. 1.55).

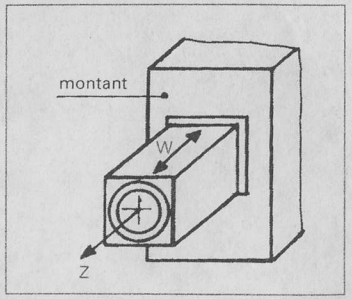


FIGURE 1.55
Schéma de fourreau de broche mobile.

2 PROCÉDÉS D'ASSEMBLAGE

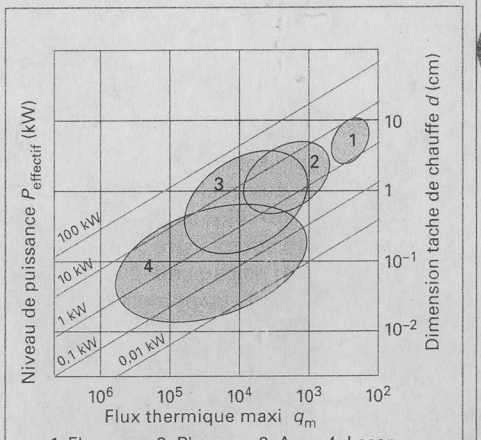
1. Soudage 33
1.1 Généralités 33
1.2 Les procédés de soudage 36
1.3 Brasage et soudo-brasage 37
1.4 Soudage oxyacétylénique 40
1.5 Soudage par aluminothermie 41
1.6 Soudage à l'arc électrique avec électrode enrobée 42
1.7 Soudage électrique TIG 44
1.8 Soudage électrique MIG 46
1.9 Soudage électrique MAG 49
1.10 Soudage sous flux conducteur 50
1.11 Soudage à l'arc plasma 52
1.12 Soudage par résistance 54
1.13 Soudage par points 54
1.14 Soudage à la molette 57
1.15 Soudage par bossages 58
1.16 Soudage par étincelage 59
1.17 Soudage par résistance-étincelage 59
1.18 Soudage par arc tournant 60
1.19 Soudage par friction 60
1.20 Soudage par explosion 62
1.21 Soudage par ultrasons 63
1.22 Soudage par faisceau d'électrons 64
1.23 Soudage au laser 67

2. Procédés d'assemblage par adhésion 72
2.1 Généralités 72
2.2 Classification des colles 72
2.3 Choix des colles 74
2.4 Caractéristiques du collage 74
2.5 Caractéristiques des assemblages 75
2.6 Essais mécaniques 78
2.7 Mise en œuvre 80
2.8 Utilisation 80
3. Assemblage par rivetage et sertissage 81
3.1 Rivetage-sertissage par mouvements combinés 81
3.2 Rivetage par autopoinçonnage 82
3.3 Sertissage 82

1. Soudage

1.1 Généralités

Procédé d'assemblage permanent, étanche si la soudure est continue, des matériaux métalliques quelles que soient leurs épaisseurs.
C'est la fusion localisée des pièces à assembler, avec ou sans métal d'apport, qui provoque la liaison après solidification (fig. 2.1).
La soudure s'effectue en phase liquide sans pression des pièces, ou en phase pâteuse, sous une pression des pièces.



1. Flamme – 2. Plasma – 3. Arc – 4. Laser

FIGURE 2.1 Surface chauffée selon procédé.

Phase liquide

Elle provoque localement des modifications métallurgiques (résilience et A % diminuent) et mécaniques (déformations).
Une soudure en phase liquide est effective lorsqu'il y a mouillage, soit l'étalement du liant en fusion (fig. 2.2).
Le mouillage s'obtient par la propreté des surfaces à assembler, la température de soudage, l'affinité des matériaux, pièces et apport.

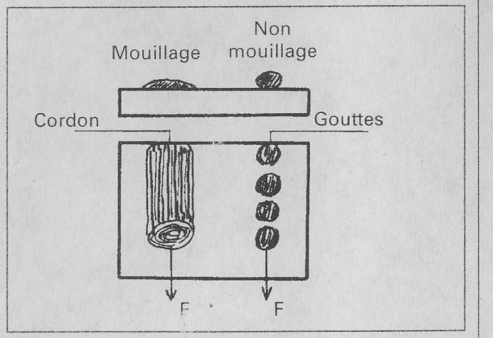


FIGURE 2.2 Mouillage des soudures.

Phase pâteuse

Les modifications, métallurgiques et mécaniques, sont très localisées.

Oxydation thermique

Les métaux s'oxydent à l'air d'autant plus que leur température s'élève.
L'oxyde s'oppose à la liaison pièces/apport ; il est nécessaire de s'opposer à la contamination atmosphérique du métal fondu par des flux de gaz (inerte ou actif) ou le vide :
en soudant à l'abri de l'oxygène, en atmosphère inerte, évitant l'oxydation ;
en réduisant l'oxyde par combinaison avec un flux moins dense que l'apport : le flux remonte avant l'atteinte de la température de soudage.

Durée de chauffe

La plus courte possible : le grain constitutif du métal ou de l'alliage des pièces à souder ne devant pas grossir dans la zone affectée thermiquement (modification des caractéristiques métallurgiques).

Dilatation thermique

L'inertie des parties froides environnantes à la soudure et le maintien des pièces à assembler s'opposent à la dilatation volumique du métal chauffé : la dilatation s'effectue suivant le plus grand degré de liberté, soit généralement l'épaisseur.

Refroidissement des pièces

Les parties non chauffées s'opposent au retour à la forme initiale, engendrant des déformations sous des contraintes de compression et d'extension, dues aux états successifs du matériau.

Les caractéristiques mécaniques et métallurgiques de la soudure dépendent particulièrement du refroidissement des pièces assemblées, qui varieront avec l'énergie du soudage et la vitesse de chauffe.

Soudabilité des métaux et alliages

Elle nécessite : utilisation d'un métal d'apport sensiblement identique aux pièces à assembler ; conditions technologiques spécifiques au procédé mis en œuvre (flux désoxydant, atmosphère neutre..).

Soudabilité des principaux métaux et alliages :

Aciers : soudabilité d'autant meilleure que la teneur en carbone est faible.

Fonte grise : soudable avec apport à haute teneur en silicium et flux désoxydant (formation d'oxyde de fer à éliminer).

Alliages d'aluminium : soudables avec flux désoxydant (formation d'oxyde d'aluminium à éliminer).

Traitements thermiques

Les recuits sont couramment appliqués sur les pièces soudées.

Recuit d'homogénéisation

Maintien entre 1 000 et 1 200° C durant 2 à 4 heures et refroidissement lent, qui régularise la structure et affine le grain.

Recuit de relaxation ou détente

Maintien entre 550 et 650 °C durant quelques minutes et refroidissement lent.

Recuit de coalescence

Maintien à température maximale Ac1 durant 2 à 4 heures et refroidissement lent.

Recuit de recristallisation

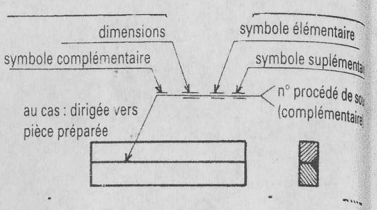
Maintien entre 500 et 700 °C durant quelques minutes, et refroidissement lent contrôlé.

Recuit de normalisation

Maintien à température supérieure à Ac3 + 50 °C durant quelques minutes et refroidissement lent.

Représentation des soudures

Définies par les normes NF E 04 020 et 021, avec représentation graphique : symboles sur les dessins (au lieu de la représentation conventionnelle toujours possible) (fig. 2.3 a...e).



a) Indications normalisées des soudures sur dessin.

Schémas soudures	Symboles	Soudures
		Bords relevés complètement fondus
		Bords droits
		En V
		En Y
		En U
		Reprise à l'envers
		D'angle
		En bouchon ou en entaille
		Par points
		En ligne continue avec recouvrement

b) Symboles élémentaires principaux.

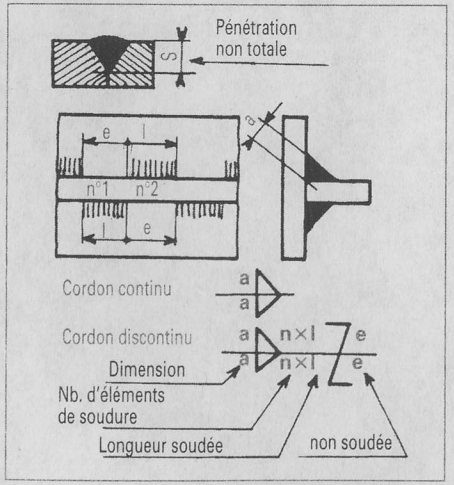
Soudures	Symboles
Soudure plate	
Soudure convexe	
Soudure concave	

Soudures	Symboles
Soudure périphérique	
Soudure sur chantier	
N° procédé de soudage	

c) Symboles supplémentaires.

d) Symboles complémentaires.

Numéros normalisés des principaux procédés de soudage	
Brasage tendre aux gaz	942
Brasage tendre au four	943
Brasage fort aux gaz	912
Brasage fort au four	913
Soudo-brasage aux gaz	971
Soudo-brasage à l'arc	972
Oxyacétylénique	311
Aluminothermie	71
Arc électrique électrode enrobée	111
Électrique TIG	141
Électrique MIG	131
Électrique MAG	135
Flux conducteur	136
Arc plasma	149
Par points	21
À la molette	22
Par brossage	23
Par étincelage	24
Par résistance-étincelage	26
Par arc tournant	25
Par friction	42
Par explosion	441
Par ultrasons	41
Par faisceau d'électrons	76
Au laser	751



e) Dimensions des soudures.

FIGURE 2.3 Définition symbolique normalisée des soudures.

1.2 Les procédés de soudage

Les différents procédés d'assemblage par soudage utilisent les énergies thermochimique, électrique par arc ou par résistance, mécanique, à énergie focalisée.

Procédés de soudage utilisant l'énergie thermochimique

Brasage et soudo-brasage, utilisant la combustion oxyacétylénique pour produire la fusion du métal d'apport de nature différente des pièces à assembler.
Soudage oxyacétylénique, utilisant la combustion d'un mélange oxygène-acétylène pour fondre les bords des pièces à souder avec un métal d'apport de même nature.
Soudage aluminothermique, avec la réduction de l'oxyde de fer par l'aluminium sous une température de soudage.

Procédés de soudage utilisant l'énergie électrique par arc

Soudage à l'arc avec électrode fusible protégée par un enrobage, et d'un métal sensiblement identique aux pièces à souder.
Soudage TIG, avec électrode réfractaire et métal d'apport, sous atmosphère de protection gazeuse inerte.
Soudage MIG, avec électrode fusible en fil continu, sous atmosphère de protection gazeuse inerte.
Soudage MAG, avec électrode fusible en fil continu, sous atmosphère de protection gazeuse active.
Soudage sous flux conducteur, avec métal d'apport dont la fusion est protégée sous un flux pulvérulent.
Soudage par plasma d'arc, sans apport, à l'aide d'un gaz ionisé, un plasma.

Procédés de soudage utilisant l'énergie électrique par résistance

Soudage par points, avec compression des pièces à souder entre deux électrodes produisant un point de soudure.
Soudage à la molette, avec compression des pièces à souder, entre une molette tournante et un support, formant électrodes.
Soudage par bossages, avec compression de points localisés par des bossages sur les pièces à souder.
Soudage par étincelage, avec accostage bout à bout des pièces à assembler, avec pression de soudage et de forgeage.

Procédés de soudage utilisant l'énergie mécanique

Soudage par friction, avec chauffe des bouts à souder par rotation d'une pièce produisant la soudure par forgeage.
Soudage par explosion, avec détonation d'une charge explosive provoquant une onde de choc déformant la pièce réceptrice sur l'autre pièce.
Soudage par ultrasons, avec des vibrations ultrasoniques produisant des frictions locales réalisant la fusion des pièces en contact.

Procédés de soudage utilisant l'énergie focalisée

Soudage par faisceau d'électrons, produisant un faisceau d'électrons focalisés aux bords à souder réalisant la fusion par conversion d'énergies.
Soudage au laser, en focalisant l'énergie d'un faisceau concentré de lumière cohérente de forte puissance réalisant la fusion des bords à souder.

1.3 Brasage et soudo-brasage

Généralités

Assemblage permanent où la brasure (métal ou alliage d'apport) est différente du matériau des pièces à assembler et la température de fusion est inférieure à celle des pièces à souder.
Le métal ou alliage d'apport est chauffé à sa température de fusion.
Les pièces à assembler doivent être à cette même température, pour obtenir le filtrage (écoulement par capillarité due à la fluidité).
La capillarité permet de braser les pièces en toutes positions, y compris par le bas d'un emboîtement en position verticale.
La résistance mécanique de la brasure dépend de: nettoyage préalable des pièces; atteinte en température de fusion de l'apport assurant le mouillage (écoulement de la brasure) (fig. 2.4).
Tensions internes et déformation des pièces assemblées sont réduites (basses températures).
Les pièces traitées sont brasées sans modifier leur structure métallique.

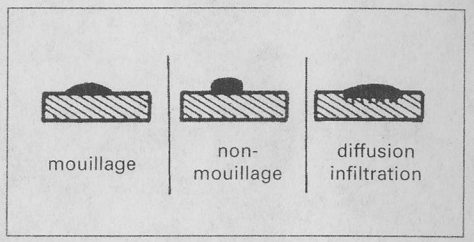


FIGURE 2.4 Mouillage de la brasure.

Mise en œuvre

Assembler les pièces par recouvrement ou emboîtement: assure l'accrochage par capillarité (fig. 2.5 et 2.6.).
Recouvrement. Au moins égal à trois épaisseurs des pièces.
Emboîtement. Avec jeu mini: 0,02 mm pour brasures à base d'argent ou de nickel; 0,2 mm pour brasures à base de cuivre et d'aluminium (fig. 2.7).
Différentes méthodes. Brasage tendre, brasage fort, soudo-brasage.

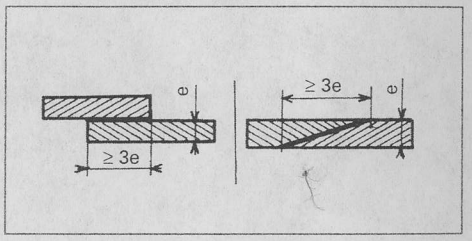


FIGURE 2.5 Brasage par recouvrement.

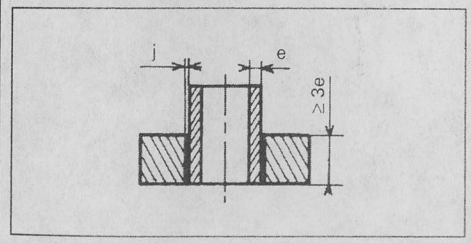


FIGURE 2.6 Brasage par emboîtement.

Cuivre-zinc et cuivre-plomb	0,05 à 0,25
Aluminium-silicium	0,10 à 0,20
Cuivre-or	0,02 à 0,05
Argent-manganèse	0,05 à 0,15
Cuivre-argent-zinc-cadmium	0,02 à 0,15

FIGURE 2.7 Jeux d'emboîtement pour différents apports.

Pièces assemblées

Ensemble des métaux et alliages, semblables ou différents, difficilement ou non soudables.

Brasage tendre

Il s'effectue à une température de fusion inférieure à 450 °C : 180 °C à 280 °C, selon la composition des apports (fig. 2.8).

Types de brasage tendre	% Sn	% Ph	$t°$	Principales utilisations
De plombier	30	70	280	Pâteuse longtemps ; peut être modelée
Au tiers ou de charge	35	65	260	Renforcement de raccords brasés
De chaudronnier	40	60	250	Peu fluide, mais peu cassante
Claire	50	50	220	Fluide pour cuivrerie et ferblanterie
Fine	60	40	200	Très fluide, cassante pour cuivrerie
Extra-fine	95	5	220	Cassante, pour conserverie

FIGURE 2.8 Composition et utilisation des brasures tendres étain-plomb.

Apports

Ce sont des alliages à base d'étain : étain-plomb, étain-argent, étain-antimoine, selon les matériaux à braser ou/et l'utilisation des pièces assemblées, soit :
aciers : apport en cuivre-zinc ;
alliages d'aluminium : apport en aluminium-silicium ;
brasures en électricité-électronique : apport en cuivre-or ;
résistance à la corrosion : apport en argent-manganèse ;
résistances mécaniques à chaud : apport à base de nickel ;
utilisations en général : apport en cuivre-argent-zinc-cadmium.

Flux

Réducteur d'oxydes : doit correspondre à chaque matériau à braser.
Constitution. Borure d'éthyle, d'alcalis, d'acides et agent mouillant (de stabilité nécessaire pour protéger les surfaces avant la fusion de l'apport et surnager sur le bain avant solidification).
Les résidus de flux sont très corrosifs : à éliminer impérativement (par lavage).
Un antimouillant permet, éventuellement, de localiser l'écoulement de l'apport.

Utilisation

Plomberie, ferblanterie (alimentaire...) cuivrerie, assemblages délicats (brasures spécifiques ne devant pas subir d'efforts mécaniques : la résistance dépend de celle de l'apport).

Brasage fort

S'effectue à température supérieure à 450 °C, avec apports en alliage de cuivre (cuivre-zinc) d'argent, d'aluminium (aluminium-silicium) (fig. 2.9).

Utilisation

Avec apports adaptés, assemblage de matériaux généralement cuivreux, des alliages d'aluminium.

Utilisation	Brasure			Résistance	Malléabilité
	$t°$ fusion	≈ % Co	≈ % Zn		
Acier/acier	1 000	80	20	Très bonne	Très bonne
Acier/cuivre	900	70	30	Bonne	Bonne
Cuivre/cuivre	850	60	40	Bonne	Bonne
Métaux cuivreux	750	40	60	Bonne	Faible

FIGURE 2.9 Composition et utilisation de brasures fortes en laiton.

Soudo-brasage

Soudure hétérogène (apport différent des pièces à assembler).
Les pièces ne sont généralement pas à chauffer à la température de fusion de l'apport.
La jonction des pièces s'effectue en continu, progressivement comme tout soudage, créant le cordon de brasure (fig. 2.10).

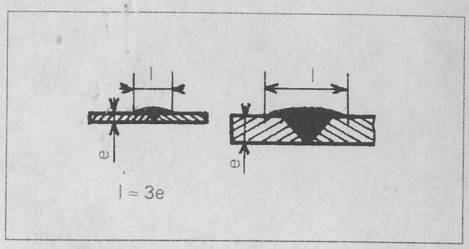


FIGURE 2.10 Jonction des pièces en soudo-brasage.

Apport

Température de fusion supérieure à 450 °C : alliage de cuivre (cuivre, zinc, silicium, de fusion à 880 °C) ; alliage d'argent ; alliage d'aluminium.

Cordon de brasure

Peu fluide, largeur minimale pour assurer son accrochage : trois épaisseurs des pièces non chanfreinées ; chanfrein sur pièces d'épaisseur > 4 mm (fig. 2.11).
L'assemblage s'effectue en recouvrement ou bout à bout (avec espace pour logement du cordon) (fig. 2.12).

Flux

En utilisation pulvérulente ou gazeuse : protège la zone en cours de brasage de l'oxydation ou scorifie les oxydes qui s'y forment.

Utilisation

Avec apports adaptés, assemblage de : aciers, cuivre et ses alliages (cupro-aluminium...), fonte, aluminium, pièces galvanisées.

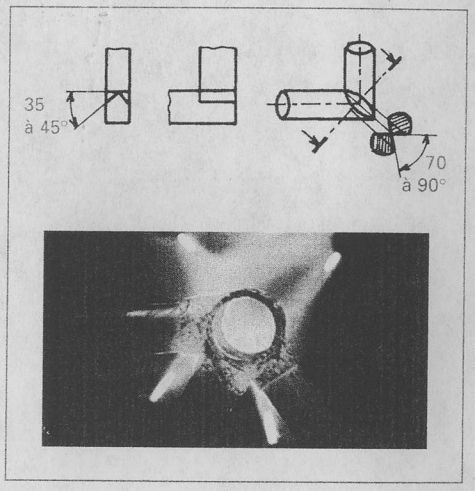


FIGURE 2.11 Préparation de pièces pour soudo-brasage et exemple. *Doc. Air liquide*

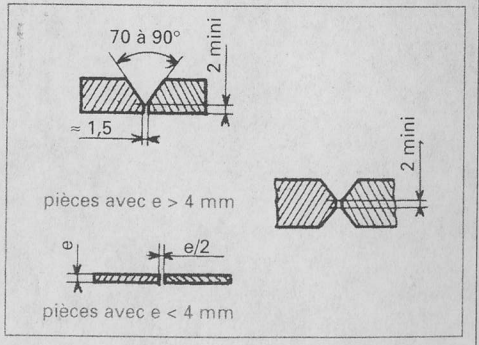


FIGURE 2.12 Préparation des pièces plates pour soudo-brasage.

1.4 Soudage oxyacétylénique

Généralités

Soudure autogène de matériaux de même nature, y compris le métal d'apport, obtenu par fusion localisée et progressive des bords à assembler.

Métal d'apport

De constitution approximativement identique à celle des pièces à assembler. Éventuellement la soudure s'effectue sans apport.
Température de fusion (3 000 °C, fournie par l'inflammation d'un mélange oxygène-acétylène (fig. 2.13).
Cordon de soudure : obtenu par la fusion des bords de pièces et de l'apport (approximativement de mêmes caractéristiques que les pièces à assembler).
Un flux décapant protège le métal de l'oxydation durant le soudage.

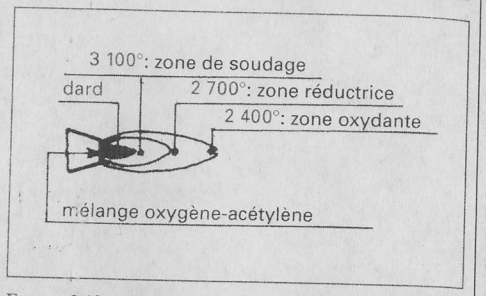


FIGURE 2.13 Flamme oxyacétylénique.

Débits et vitesses de soudage

Bec du chalumeau à adapter à l'épaisseur *e* des pièces.
Le débit d'acétylène est indiqué en litres/heure, pour soudage bout à bout des pièces à plat de 1 mm d'épaisseur (fig. 2.14).

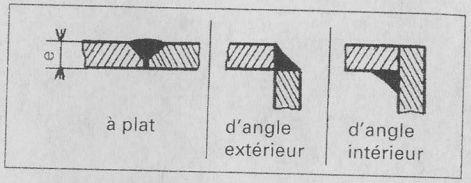


FIGURE 2.14 Types d'assemblage pour soudage.

Débits approximatifs

Soudure à plat, 100 *e* ; soudure d'angle en extérieur, 75 *e* ; soudure d'angle en intérieur, 125 *e*.
Les becs des chalumeaux ont leur débit identifié par un numéro (00,0,1,2,3) normalisé NF A 84-541, pour les valeurs de 10 à 5 000 litres/heure d'acétylène (fig. 2.15).

N° 00	de 10 à 63 l/h de C_2H_2
N° 0	de 100 à 400 l/h
N° 1	de 250 à 1 000 l/h
N° 2	de 1 000 à 4 000 l/h
N° 3	> 4 000 l/h

FIGURE 2.15 Débits des chalumeaux de soudage.

Flamme oxyacétylénique

Elle est considérée comme normale avec le rapport des volumes oxygène/acétylène égal à environ 1 ; oxydante avec un excès d'oxygène ; carburante avec un excès d'acétylène (fig. 2.16).
Puissance de chauffe : elle est proportionnelle à sa vitesse de propagation et se transmet aux pièces par convection et rayonnement.

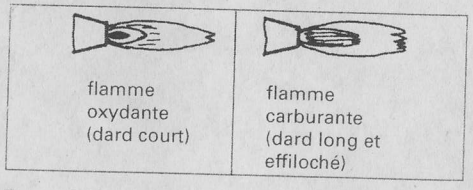


FIGURE 2.16 Types de flammes non utilisables.

Vitesse de soudage

V = k/e ; avec k, coefficient de soudage du matériau = 12 pour aciers, 30 pour alliages d'aluminium, 60 pour alliages de cuivre ; e, épaisseur des pièces.

Mise en œuvre

Cordon de soudure : il provoque une déformation de retrait : s'y opposer ou à localiser dans des zones neutres, sur des formes symétriques (fig. 2.17).
Préparation des bords à assembler :
nécessaire en soudage à plat (fig. 2.18).
Pièces minces : de préférence souder sans métal d'apport, les bords à assembler étant relevés de *e*.
Pièces peu épaisses : bords chanfreinés en vé ; éventuellement, bords non chanfreinés espacés de *e*/2.
Pièces épaisses : bords chanfreinés des deux côtés (deux vés opposés) ; éventuellement, avec soudage d'un côté accessible : une rainure profonde.
Autres positions de soudage : d'angle intérieur et extérieur... aucune préparation n'est nécessaire.

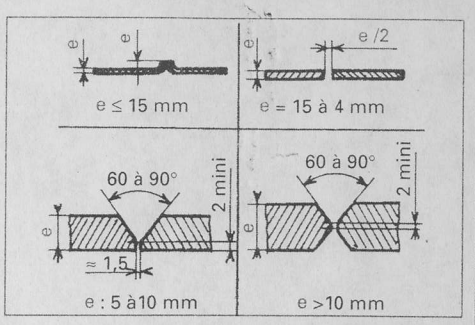


FIGURE 2.17 Préparation des pièces à souder à plat.

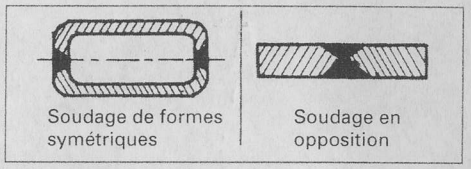


FIGURE 2.18 Cordons de soudure s'opposant à la déformation.

Utilisation

La plupart des matériaux métalliques sont soudables par fusion oxyacétylénique.
Pour certains matériaux (aciers inoxydables et de teneur en carbone supérieure à 0,25 %, fontes, cuivre, alliages constitués d'éléments volatils à la température de soudage) : avec métal d'apport spécifique.
Soudage en une passe : assemblage permanent en particulier des pièces peu épaisses : tubes et profilés en construction métallique (mécano-soudure), chaudronnerie... : tôles en cartérisation (électroménager, transport...)

1.5 Soudage par aluminothermie

Généralités

Réaction chimique exothermique de réduction de l'oxyde de fer par de l'aluminium en poudre.
On a : $Fe_2O_3 + 2\,Al$ qui devient $Al_2O_3 + 2Fe$ produisant environ 180 000 calories.
Thermit : mélange constitué d'aluminium en granulés, d'oxydes de fer pulvérulent additionné d'éventuels éléments d'addition (carbone, silicium...).
L'oxyde de fer et les éléments d'addition produisent l'alliage du cordon.
La réaction chimique est amorcée par un apport de chaleur de 1 200 °C environ et se propage ensuite rapidement (de 30 secondes à 2 minutes) dans le thermit jusqu'à la température de 2 400 °C maximum.

Mise en œuvre

Les bouts de pièces à assembler, non oxydés, sont préchauffés avant la coulée de l'apport en fusion.

Ils sont maintenus dans un moule (destructible, avec coulée en source et en chute) constitué d'aluminium en poudre (fig. 2.19).

Utilisation

Assemblage permanent bout à bout des fortes sections de pièces massives (construction lourde).

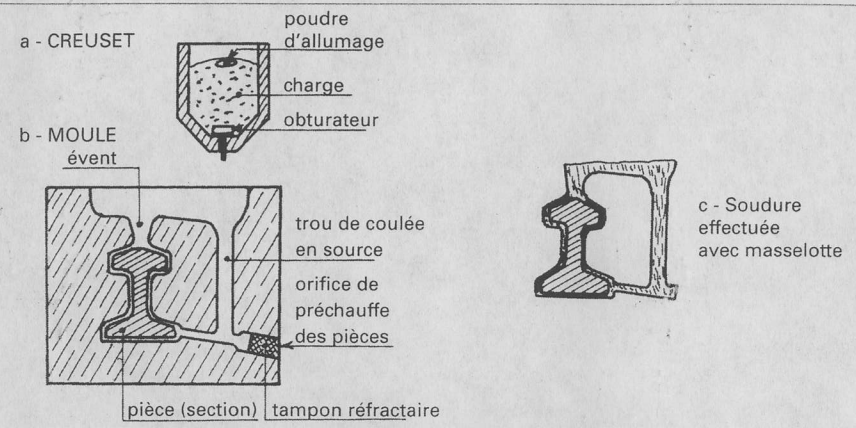


FIGURE 2.19 Schéma de moule de soudage par alumothermie.

1.6 Soudage à l'arc électrique avec électrode enrobée

Généralités

Soudure autogène de matériaux métalliques de même nature, avec métal d'apport de composition sensiblement identique aux pièces à assembler.
La fusion, localisée et continue, est obtenue au point d'impact d'un arc électrique créé instantanément entre les pièces à assembler et l'extrémité d'une électrode.
Au point d'arc, les deux pièces et le métal d'apport fondent, créant une soudure autogène (fig. 2.20).
Le courant électrique de soudage, continu ou alternatif, est défini en tension et intensité.
L'arc est obtenu par thermo-ionisation, avec l'émission d'électrons d'une cathode incandescente (l'électrode) bombardant l'anode (les pièces) avec ionisation du gaz situé entre l'électrode et les pièces.
Il est fonction de trois paramètres : tension aux bornes, intensité du courant le parcourant, distance anode-cathode.
L'anode, bombardée électroniquement, est plus chaude que la cathode.

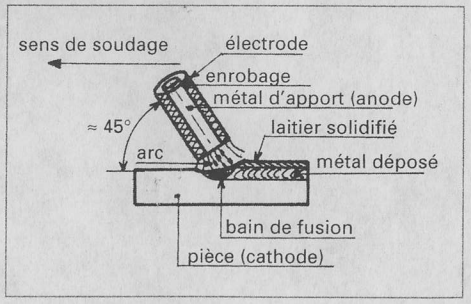


FIGURE 2.20 Schéma de la zone de soudure avec électrode enrobée.

La différence de température dépend de : l'intensité du courant, la différence de potentiel entre anode et cathode ; la distance entre elles (longueur d'arc).

Intensité

Pour une intensité donnée, la tension est en fonction croissante de la longueur d'arc (fig. 2.21).
En courant continu, l'arc est stable ; en courant alternatif, la stabilité de l'arc est assurée par assistance (d'un oscillateur haute fréquence, d'un enrobage des électrodes...).
Nota : Les intensités de soudage maxi-mini sont indiquées sur le conditionnement des électrodes.

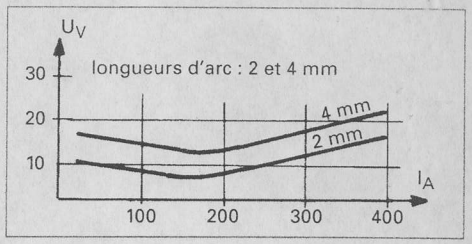


FIGURE 2.21 Tension en fonction de l'intensité de soudage et de la longueur d'arc.

Électrode

Sa fusion constitue l'apport de métal.
Elle amorce, maintient, dirige l'arc électrique et s'oppose, avec son enrobage, à l'oxydation par l'air ambiant du métal en fusion.
Les électrodes sont normalisées avec des diamètres standards (1.2, 1.6, 2, 2.5, 3.15, 4, 5, 6.3), et des couleurs conventionnelles spécifiant leurs caractéristiques (fig. 2.22).
Le choix est fonction des pièces à assembler (matériau, épaisseur, méthode) avec Ø électrode ≤ épaisseur à souder.

Couleur	Rose	Rouge	Jaune	Blanc	Vert
Rm daN/mm²	< 40	40 à 48	48 à 56	56 à 65	> 65

FIGURE 2.22 Couleurs des électrodes de soudage.

Enrobage de l'électrode

Fusible, il se dépose en laitier protecteur sur le bain d'alliage en fusion : stabilise l'arc, désoxyde l'alliage, favorise la cristallisation.
Sa fusion est retardée par rapport au métal de l'électrode créant un canon directement de l'arc et engendrant une atmosphère ionisée et désoxydante.
Il a des effets électrique, mécanique, métallurgique.
Électrique, par l'amorce et le maintien de l'arc stable.
Mécanique, par la viscosité du laitier maintenant le métal en fusion avec formation d'un cratère guidant les gouttes.
Métallurgique, par la protection du métal en fusion contre l'oxydation, l'atténuation des effets de trempe, le dégazage.
Il est lié à l'utilisation de l'électrode, soit :
Basique, pour un maximum d'utilisations, en toutes positions. Le transfert s'effectue en grosses gouttes.
Cellulosique, pour gros travaux, position descendante, dans chanfreins, rechargement (de l'hydrogène augmente la température de l'arc, donc la pénétration).
À base de Rutile, pour travaux de précision, en toutes positions, de bonnes qualités mécaniques.
Le transfert s'effectue à fines gouttes, avec production d'un métal non oxydé.
Avec adjonction de poudres métalliques, pour travaux spécifiques.

Utilisation

Construction métallique (charpente, chaudronnerie ; construction mécanique (machines, appareillages,...) ; assemblage de tôles d'épaisseur minimales ≃1 mm.

1.7 Soudage électrique TIG

Généralités

TIG = Tungsten Inert Gas
Fusion des pièces à assembler par l'énergie calorifique qu'un arc électrique dégage (à 3 000 °C) en éclatant dans une atmosphère protectrice, entre une électrode réfractaire et les pièces à assembler (fig. 2.23).

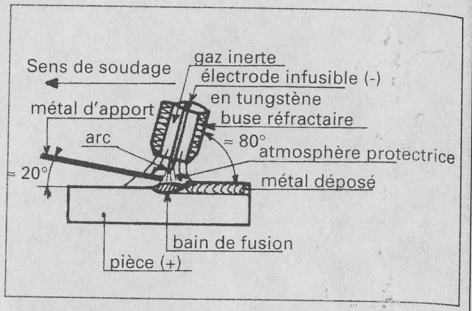


FIGURE 2.23 Schéma de la zone de soudage avec torche TIG.

Torche de soudage

Supporte l'électrode réfractaire, dirige un jet de gaz inerte sur le métal en fusion, protégeant le bain de soudure de l'oxydation.
Il y a opposition à toute réaction chimique et pas de production de laitier.
Elle est refroidie par l'air ambiant et la circulation du gaz en soudage de faible intensité (≈150 ampères) ; par l'eau au-delà de 150 A.
L'électrode, en tungstène (avec addition de thorium pour les aciers) est au pôle négatif (cathode) ; son diamètre est en rapport avec l'intensité de soudage (fig. 2.24).

Diamètre des électrodes	Diamètre des buses	Intensité
1	6 à 9	15 à 50
1,6	9 à 11	60 à 150
2	11 à 13	100 à 200
2,4	13 à 15	130 à 250
3,2	15 à 18	220 à 300
4	15 à 18	300 à 400
5	18 à 22	350 à 550

FIGURE 2.24 Intensité de soudage en fonction du diamètre de l'électrode.

Métal d'apport

Amené automatiquement dans la zone de fusion par dévidage d'un fil à vitesse constante.
Introduit en bordure du bain, il ne transfère pas dans l'arc, d'où aucune surchauffe de l'apport : évite la dégradation chimique (pureté du métal conservée) et la volatilisation (pas de fumée nocive).
Il peut contenir des éléments désoxydants (silicium, manganèse).
Son dévidage est indépendant de l'arc : soudage éventuel sans apport (facilite début et fin de l'opération).

Vitesse de soudage

8 à 40 cm/min, selon les épaisseurs à souder et les matériaux.
Les soudures s'effectuent manuellement et automatiquement, sauf pour TIG FORCE (essentiellement soudage manuel).

TIG FORCE

Avec une protection du bain sous double circuit gazeux, l'arc de soudage est rigidifié, assurant : réduction de l'intensité de soudage (jusqu'à 50 %) ; augmentation de l'épaisseur soudable ; diminution de la déformation des pièces (fig. 2.25).
Utilisation.
Essentiellement en soudage manuel. L'arc est stable, contribuant à une fusion et une pénétration régulières.

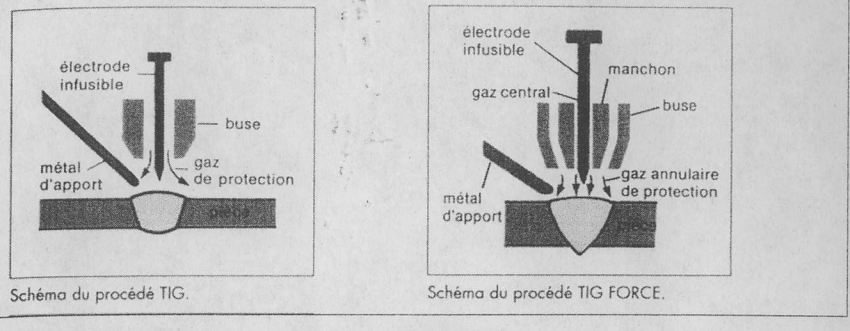


FIGURE 2.25 Forme des cordons de soudure. Soudage avec torches TIG et TIG FORCE. *Doc. Air liquide*

TIG chaud

Avec préchauffe du métal d'apport, par effet Joule, la quantité de son dépôt est réglable.

Gaz de soudage

L'argon avec généralement addition d'hélium et d'hydrogène, conformément à la norme européenne EN 439.
Chimiquement non oxydant, étant spécifique au matériau à assembler, on utilise :
Aciers non et faiblement alliés. Hélium et hydrogène : améliorent la productivité et les conditions de travail.
Aciers inoxydables. Mélange argon-hélium-oxygène, métallurgiquement compatible avec le matériau-pièces.
Soudage monopasse sans chanfrein et multipasses avec : forte pénétration de la soudure ; amélioration des performances et des conditions de travail (réduction des oxydes d'azote) (fig. 2.26).
Alliages d'aluminium et de cuivre. Le gaz est nécessairement inerte pour protéger métallurgiquement le métal en fusion.
Une forte teneur en hélium permet le soudage sans chanfrein ni écartement des pièces.
Métaux et alliages spéciaux (titane, tantale...) Une protection gazeuse complémentaire s'oppose à la fragilisation des pièces par affinité chimique gaz-métal.
Une protection pré et post-bain de fusion est nécessaire pour éviter la contamination (fig. 2.27).

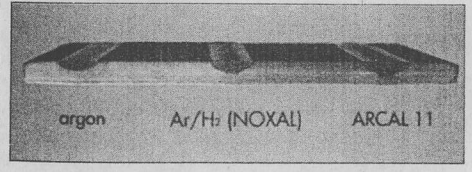


FIGURE 2.26 Pénétration des soudures TIG FORCE, sans chanfreinage des pièces. *Doc. Air liquide*

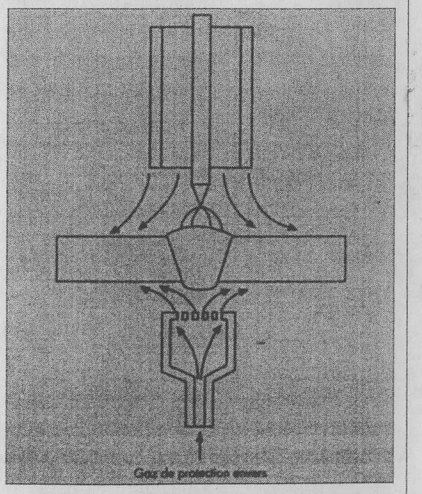


FIGURE 2.27 Protection gazeuse pré et post-bain de fusion. *Doc. Air liquide*

Préparation des pièces

Comme pour le soudage en général (vé, tulipe, x...) avec une propreté des bords indispensable.
Le gaz devra pouvoir circuler sous les pièces minces et les aciers inoxydables dans la zone de soudage (latte avec canal, bords relevés des pièces) (fig. 2.28).

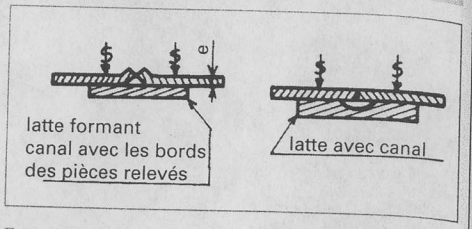


FIGURE 2.28 Circulation du gaz sous les pièces minces ($e < 1$ mm).

Utilisation

Les matériaux oxydables sont particulièrement soudables : aciers non et faiblement alliés, inoxydables, alliages d'aluminium et de cuivre, alliages spéciaux.
Réalisation de soudures de grande qualité métallurgique et esthétique (industries chimiques, alimentaires, aéronautiques, chaudronnerie d'inoxydables...) : pièces de faible épaisseur (quelques dixièmes de mm) ; soudures en passes de fond.

1.8 Soudage électrique MIG

Généralités

MIG : Metal Inert Gas
Fusion des pièces à assembler par l'énergie calorifique qu'un arc électrique dégage sous atmosphère protectrice entre un fil-électrode fusible et les pièces à assembler (fig. 2.29).

Fil-électrode

Au pôle positif (anode) par tube de contact conduisant le courant.
Métal d'apport amené automatiquement à vitesse constante de 2 à 12 m/min, en fonction des intensités utilisées (50 à 500 ampères) (fig. 2.30).
Selon les épaisseurs à souder, son diamètre est de 0,5 à 2,4 mm.
Utilisation d'un fil nu ou fourré (fil creux contenant un flux solide) (fig. 2.31).
Torche de soudage. Refroidie à l'air ambiant jusqu'à environ 350 ampères ; au-delà, par circulation d'eau.

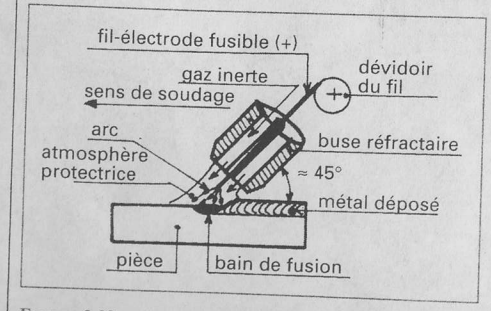


FIGURE 2.29 Schéma de zone de soudage avec touche MIG.

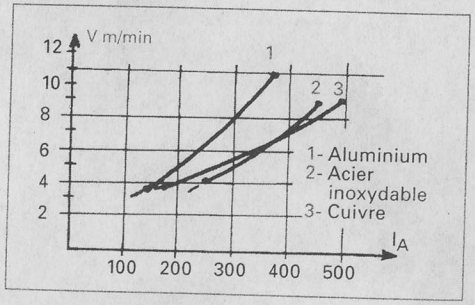


FIGURE 2.30 Dévidement de l'apport selon l'intensité de soudage (pour fil Ø 1,6).

Le courant utilisé est un courant redressé. Le transformateur-redresseur délivre une tension constante, du fait de ses caractéristiques externes « plates ».
La polarité inverse (électrode-anode) produit des gouttelettes fines et nombreuses.

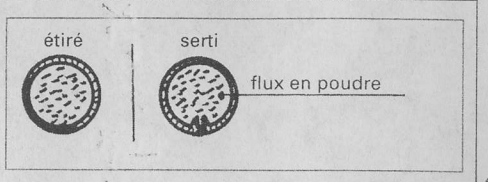


FIGURE 2.31 Différents fils fourrés (Ø 1,6 à 4 mm).

Régimes de transfert du métal d'apport et utilisation

L'arc est produit sous plusieurs régimes, la fusion du fil-électrode et son dépôt variant en fonction de la densité du courant (A/mm²), soit les régimes principaux de transfert du métal dans l'arc (fig. 2.32).

Régime pulvérisation axiale (SPRAY ARC)

Le métal transfère sous fortes intensités dans l'arc, en fines gouttes, très régulièrement.
Utilisation en soudage des fortes épaisseurs (au-delà de 5 mm) en position à plat.

Régime court-circuit (SHORT ARC)

Le métal transfère dans l'arc par alternance de courts-circuits et de périodes d'arc.
Le court-circuit s'établit au contact goutte/pièces provoquant le transfert, la faible tension limite le diamètre des gouttes.
Utilisation en soudage de faibles épaisseurs, en toutes positions sans support arrière.

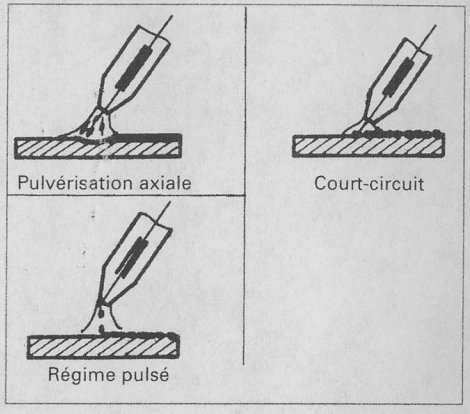


FIGURE 2.32 Différents régimes de soudage.

Régime pulsé

Un générateur de soudage, provoquant des pulsations, transfère le métal en gouttes du diamètre désiré.
Utilisation en soudage de faibles épaisseurs et en grosses gouttes.
L'arc est stabilisé par la superposition d'un courant pulsé.

Gaz de soudage

Ils ont une action sur le mode de transfert du métal d'apport, généralement métallurgique, par leur comportement chimique et leur influence au refroidissement du bain (fig. 2.33).

	GAMME	QUALITE COURANTE		ARCAL		
	GAZ	CARGAL 1	NOXALIC 12	ARCAL 12	ARCAL 112	ARCAL 121
CONDITIONS DE TRAVAIL / PRODUCTIVITE	VITESSE DE SOUDAGE					
	PENETRATION					
	ABSENSE DE PROJECTION					
QUALITE ASSEMBLAGE / ASPECT	MOUILLAGE					
	OXYDATION					
	ABSENCE DE PROJECTION					
CONFORT OPERATOIRE	STABILITE D'ARC					
	ABSENCE DE PROJECTION					
	FACILITE DE REGLAGE					
POLYVALENCE	REGIME D'ARC					
	MATERIAUX					
	MULTIPASSES					
	POSITIONS					
	FILS PLEINS ET FOURRES					
ENVIRONNEMENT	FUMEES					
	EFFLUENTS GAZEUX NOCIFS (CO - NOX - O3)					

EXCELLENT BON MEDIOCRE

FIGURE 2.33 Utilisation de gaz en soudage MIG des aciers.
Doc. Air liquide.

Gaz neutre. L'argon, avec addition d'hydrogène, d'oxygène ou d'hélium, selon les matériaux à souder et éventuellement pour un régime donné.
L'hélium. À tous les régimes, en soudage mono ou multipasses : oxydation réduite du cordon ; nocivité réduite ; vitesse de soudage accrue (≈15 %).

Matériaux soudables

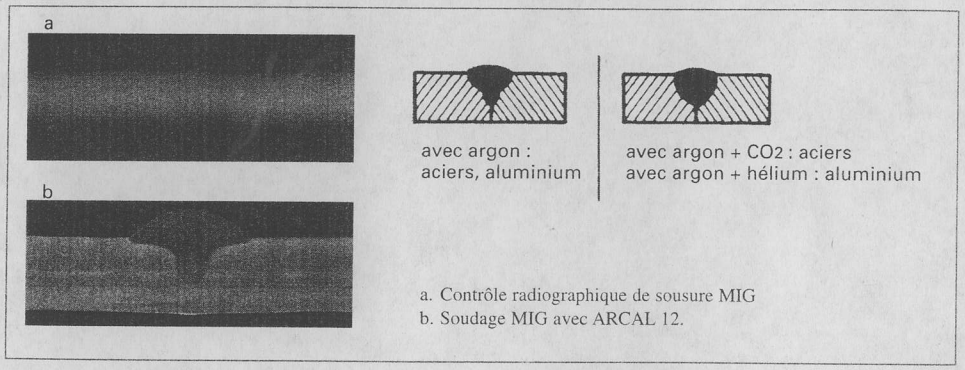
Aciers non et faiblement alliés, inoxydables, alliages d'aluminium, de cuivre, de nickel.

Soudage des aciers

L'arc est stabilisé par un mélange faiblement oxydant, facilitant le mouillage.
Régime pulsation axiale. Argon additionné d'un faible pourcentage d'oxygène : réduction des tensions superficielles du bain. Soudage en monopasse et multipasses.
Régime court-circuit. Argon additionné d'oxygène et d'hydrogène. Soudage en position.
Régime pulsé. Argon additionné de tous les gaz utilisés. Soudage des aciers inoxydables austénitiques : qualité métallurgique (stabilité de l'arc avec oxydation réduite) rapidité de soudage.

Soudage des alliages d'aluminium, de cuivre, de nickel

Mélange argon-hélium (70 % maximum) assure : stabilité de l'arc avec un minimum de nocivité (oxydes d'azote).
Soudures de qualité : compacité, pénétration massive, résistance à la fissuration à chaud (fig. 2.34).



a. Contrôle radiographique de sousure MIG
b. Soudage MIG avec ARCAL 12.

FIGURE 2.34 Qualité et formes de soudures MIG. *Doc. Air liquide.*

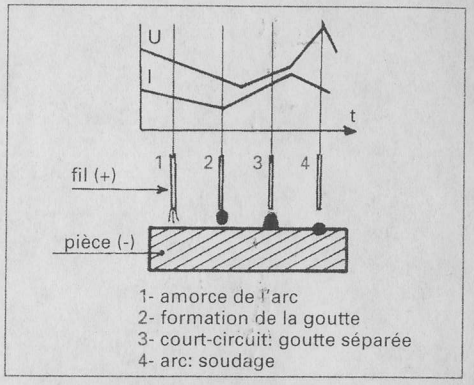
Utilisation

Soudage manuel (appelé semi-automatique par suite de l'alimentation du fil en continu).
Soudage automatique (dont robotisé) : soudures en toutes positions et rapidité en constructions maritime, civile, ferroviaire, automobile, chaudronnerie, métallerie, etc.

1.9 Soudage électrique MAG

Généralités

MAG = Metal Active Gas.
Similaire au procédé MIG, à la différence que le gaz est actif sur la zone de soudage.
L'arc est produit sous les mêmes régimes que le procédé similaire TIG (pulvérisation axiale, court-circuit, pulsé).
En régime pulsé, la qualité des soudures est excellente : compacité du métal, très bonne pénétration (fig. 2.35).



1- amorce de l'arc
2- formation de la goutte
3- court-circuit: goutte séparée
4- arc: soudage

FIGURE 2.35 Allure du transfert en régime pulsé.

Gaz de soudage

Le gaz actif est un mélange binaire ou tertiaire de gaz carbonique, d'argon, d'oxygène, d'hélium.
Les éléments oxydants du mélange stabilisant l'arc sont actifs par leur action sur la viscosité du bain et la compacité de la soudure obtenue (fig. 2.36).
Ces mélanges peuvent être polyvalents ou spécifiques à une utilisation (technique et sécurité) et un régime d'arc.

Utilisation

Assemblage essentiellement des aciers non alliés et faiblement alliés, en production industrielle : soudage automatisé et robotisé en continu et par points.
Les tôles minces sont soudables en toutes positions sous le régime pulsé (superposé au courant de faible intensité, permettant un plus faible dégagement de chaleur).

Soudage à plat

Il s'effectue en régime sous arc long, le transfert se produisant en pluie, avec une intensité supérieure à 200 ampères (fig. 2.37 a).

Soudage en toutes positions

Il s'effectue en régime sous arc court, le transfert se produisant en grosses gouttes, avec une intensité inférieure à 200 ampères (fig. 2.37 b).

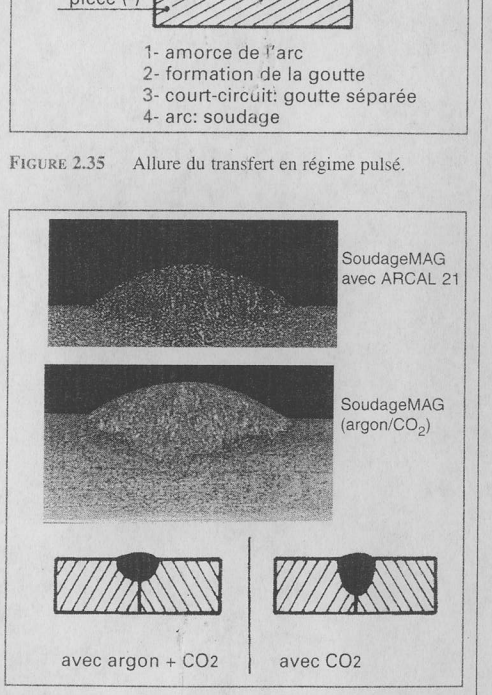


FIGURE 2.36 Qualité et formes de soudures MAG. *Doc. Air liquide*

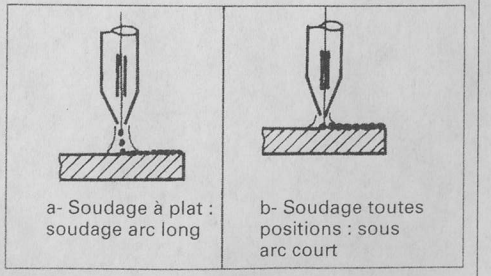


FIGURE 2.37 Régimes de soudage MAG.

1.10 Soudage sous flux conducteur

Généralités

Jaillissement d'un arc électrique sur un fil-électrode, situé sous une couche pulvérulente de flux en poudre produisant la fusion du fil-électrode et des bords des pièces à assembler (fig. 2.38).
Le transfert du métal d'apport (issu du fil-électrode – généralement au pôle positif – se déroulant automatiquement) s'effectue par gouttelettes enrobées de flux fondu, sans projections.

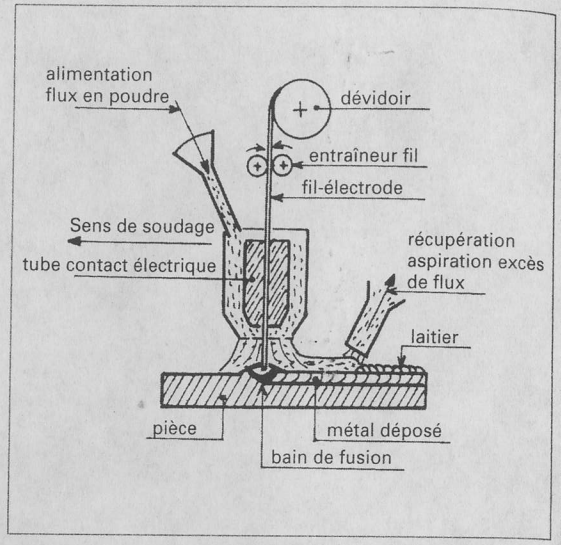


FIGURE 2.38 Schéma de zone de soudage sous flux conducteur.

Le flux

Il est conducteur du courant, à chaud, comme l'enrobage du courant.
Il participe à la formation du bain et provoque son lent refroidissement avec un important dépôt.
La finesse du flux agit sur la largeur du cordon.
Une fine granulométrie assure le meilleur mouillage. Le cordon sera plus large et la pénétration sensiblement plus faible.
Une grosse granulométrie favorise le dégazage du bain et la non-porosité de la soudure.
Il contient des éléments désoxydants (agissant comme l'enrobage d'électrode et pouvant être constitué d'éléments d'addition avec des caractéristiques mécaniques du joint améliorées).
Il forme une couche de laitier sur la soudure. L'excédent, non fondu, est aspiré à l'arrière du soudage.

L'arc

Il est régulé, comme avec le procédé MIG. Il est stable en courant continu jusqu'à ≃ 500 A ; au-delà, courant alternatif nécessaire (non-déviation de l'arc).
Le courant de soudage est de faible tension (25 à 40 volts).
L'arc de soudage est invisible. Il se produit sous l'apport du flux, ne nécessitant pas de protection visuelle (masque de soudage) pour opérateur.
Le bain est important, avec risque de fissuration à chaud : respecter un rapport longueur/profondeur du bain = 1,5.

Cordon de soudure

De bonne qualité (chimique, mécanique, esthétique) : la gangue du laitier protège le bain durant sa solidification.
Il est lisse, brillant, ne nécessitant pas d'opération de finition.
Fil-électrode. Diamètre maxi 10 mm, en alliage de soudage désiré.
Il reçoit le courant près des pièces par un tube contacteur.
Énergie de soudage très élevée : grande pénétration, vitesse de soudage très élevée (3 m/min).

Torches de soudage

De trois types : avec fil toronné, avec fil enrobé, sous flux magnétique.

Torche avec fil toronné

Le fil-électrode est entouré d'un toron de fils d'acier conduisant le courant à l'extrémité du fil : suppression des effets d'induction (fig. 2.39 a).

Torche avec fil enrobé

Le fil-électrode est dans une gaine contenant le flux qui l'enrobe : obtention de soudures relativement fines (fig. 2.39 b).

Torche sous flux magnétique

Le flux contient des éléments magnétiques le faisant adhérer au fil-électrode par le champ magnétique agissant à la fusion (fig. 2.39 c).

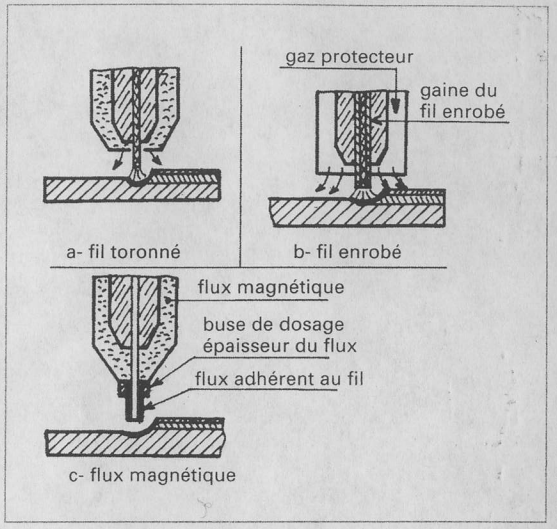


FIGURE 2.39 Schéma des différentes torches de soudage.

Pièces à assembler

À préparer sans chanfrein (fig. 2.40) : énergie de soudage élevée.
Le soudage s'effectue essentiellement à plat – sauf appareillage spécial – le flux devant être déversé sur l'arc pour le protéger.
Une fine granulométrie du flux soutient l'arc en fusion : soudage possible en position légèrement inclinée.

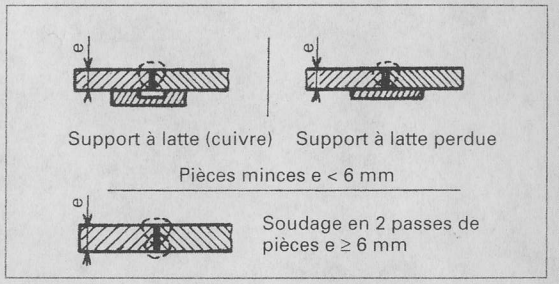


FIGURE 2.40 Préparation de pièces sans chanfreins.

Machines

De fonctionnement automatique : avance de soudage, déroulement de l'apport et amenée du flux.
L'apport s'effectue : à un fil ; à deux fils simultanément ou par feuillard augmentant le débit d'apport et la vitesse de soudage.
Le système de production (machine de soudage, fixation et positionnement des pièces, mouvement d'avance) pour pièces d'importantes dimensions, nécessite une production de série.

Utilisation

Exclusivement en soudage des aciers (alliés, non alliés, inoxydables) de grandes pièces (longs cordons de soudure) : poutres de section constituée en plaques soudées (caisson, IPN,...) tôles de réservoirs sous pression, raboutage de tôles, etc.

1.11 Soudage à l'arc plasma

Généralités

C'est un soudage TIG où l'arc, étranglé, concentre l'énergie avec un jet de gaz plasmagène, provoquant le soudage en pénétration dans l'épaisseur des pièces à assembler.
Le gaz plasmagène est porté à l'état de plasma par un arc électrique établi entre une électrode réfractaire (en tungstène) formant cathode, et généralement les pièces à souder (anode) (fig. 2.41).
Le gaz traverse une tuyère – refroidie par fluide caloriporteur – le constrictant mécaniquement et cinétiquement, provoquant une forte ionisation, d'où élévation de température (de 8 000 à 25 000 °C) localisée dans l'axe de la colonne d'arc.
Le gaz ionisé, à son passage autour de l'électrode, le plasma, crée un champ électromagnétique se manifestant par effet de striction tendant à regrouper les particules ionisées – les plus chaudes – dans l'axe de la colonne d'arc.
Le débit de la tuyère est fonction de l'intensité du courant.
Avec une intensité élevée, on pourra utiliser une tuyère convergente-divergente, limitant la formation d'arcs parasites (fig. 2.42).

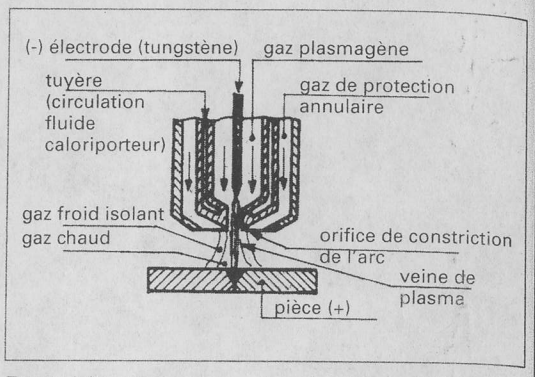


FIGURE 2.41 Schéma de zone de soudage à l'arc plasma.

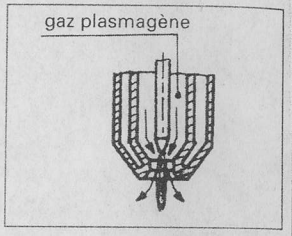


FIGURE 2.42 Schéma de tuyère convergente-divergente.

Gaz de soudage

Gaz plasmagène

L'argon, d'un faible potentiel d'ionisation.
L'hydrogène, en addition de 2 à 5 %, sauf contraintes métallurgiques : augmente la conductibilité thermique, d'où la vitesse de soudage.

Gaz de protection (gaz annulaire)

Argon additionné d'hydrogène (10 % maxi).
Diffusion en périphérie du jet : limite une fusion superficielle aux bords de la soudure (par dilution du jet plasma autour d'un jet central) ; protège de l'oxydation le métal en fusion (fig. 2.41).
L'hydrogène améliore l'aspect du cordon, le mouillage et augmente la vitesse de soudage.
L'hélium, en remplacement de l'hydrogène néfaste au métal des pièces à souder, en gaz d'addition pour certains matériaux (zirconium...).

Gaz envers de protection

Nécessaire pour protéger les matériaux sensibles à la contamination par l'air ambiant (titane, tantale...) et pour les aciers inoxydables, comme en soudage TIG (fig. 2.27).

Nota : Un apport de métal, en fil dévidé automatiquement devant la torche, peut être éventuellement effectué.

Régimes de soudage

L'arc produit peut être transféré ou soufflé (fig. 2.43 a et b).
Pour chacun d'eux, le courant de soudage est redressé avec une tension à vide de 80 volts minimum.
L'arc électrique, restant relativement stable à faible intensité, permet la microsoudure (microplasma ou miniplasma).

Soudage à l'arc plasma soufflé

L'arc jaillit entre l'électrode-cathode et la tuyère formant anode : soudage à faible énergie de matériaux conducteurs ou non de l'électricité.
C'est un complément au soudage TIG.
Vitesse de soudage 100 à 200 mm/min sous intensité de 0,2 à 30 ampères ; ionisation auxiliaire du gaz.

Utilisation

Mini et microplasma en soudage automatique, sans métal d'apport, de pièces minces (0,01 à 1 mm).
Préparation des pièces : en soudage en bout, avec jeu maxi = 1/10 épaisseur de pièces (très délicat), à recouvrement, à bords relevés (fig. 2.44).

Soudage de l'arc plasma transféré

L'arc s'établit entre l'électrode-cathode et les pièces à souder (anode).
Le jet de plasma provoque une forte pénétration de fusion, produisant un trou de serrure (« Key-hole ») qui se referme avec le déplacement du jet, formant soudure.
Soudure en profondeur (jusqu'à 10 mm) avec compacité, sans support envers (fig. 2.45).
Soudage avec raccordement du cordon départ-arrivée (soudure circulaire).
Effectué en passage d'un cycle à jet débouchant à un cycle d'évanouissement de l'arc (jet non débouchant, puis extinction).

Utilisation

Obtention, par soudage automatique, de soudures compactées à forte pénétration (à jet débouchant), d'excellente qualité métallurgique.
Soudage en une seule passe, généralement sans métal d'apport et sans soutien à l'envers pour des épaisseurs de 3 à 10 mm (fig. 2.46 a et b).
Préparation des pièces : aucune en bord à bord.

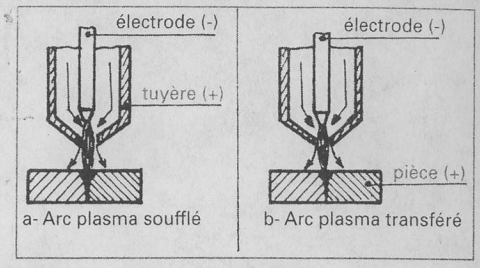


FIGURE 2.43 Schéma d'arcs plasma.

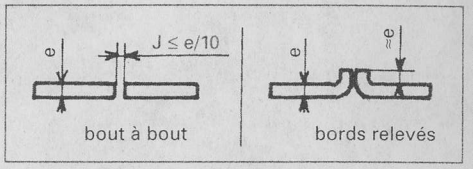


FIGURE 2.44 Préparation de pièces minces.

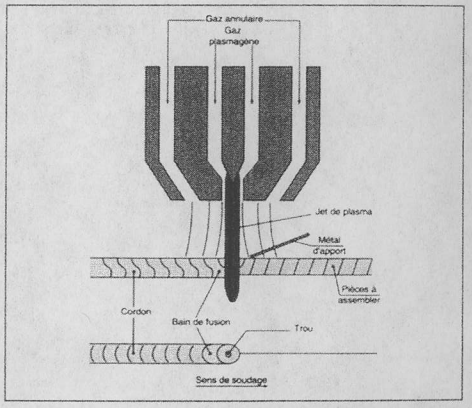


FIGURE 2.45 Bain de fusion autour du « key-hole ».
Doc. Air liquide

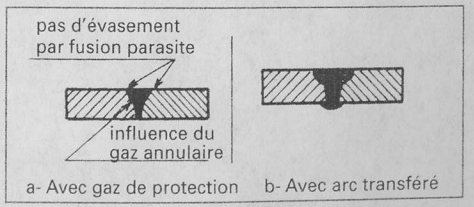


FIGURE 2.46 Schéma de soudures à l'arc plasma.

Matériaux soudables

Les aciers alliés et faiblement alliés, les aciers inoxydables et les matériaux sensibles à l'oxydation d'épaisseur ≃ 10 mm maxi.
Les alliages de nickel et de titane, les alliages de cuivre en faible épaisseur.
Nota : L'aluminium et ses alliages ne sont pas soudables par ce procédé.

1.12 Soudage par résistance

Généralités

Les différents procédés consistent à faire traverser un courant de basse tension et de forte intensité, dans une zone très localisée des pièces à assembler maintenues en contact par recouvrement ou bout à bout.
L'effort appliqué sur les pièces en contact provoque l'accostage de l'arc ; la chauffe par effet Joule ; la fusion des pièces à l'impact.
Après coupure de courant, l'effort de contact assure le soudage des deux pièces sans métal d'apport.
Des électrodes provoquent le contact des pièces. Elles sont nécessairement meilleures conductrices que les pièces à souder.
L'échauffement E le plus important ayant toujours lieu là où la résistance électrique R est la plus grande, soit au contact des pièces à souder, on a donc : R électrodes < R pièces, d'où E pièces > E électrodes.

Types de soudage par résistance

En recouvrement : par points, à la molette, par bossages.
En bout à bout : par étincelage, résistance-étincelage.

1.13 Soudage par points

Généralités

Il est obtenu sur les pièces à recouvrement maintenues entre deux électrodes en cuivre ou alliage de cuivre.
Le contact s'établit par : compression des pièces entre les deux électrodes refroidies par circulation d'eau ; accostage, faisant passer un courant (de forte intensité et basse tension) entre les deux électrodes.
Il se produit un échauffement puis une fusion de métal dans la zone à plus grande résistivité et non refroidie, soit au contact des pièces dans l'axe des électrodes (fig. 2.47).
Le noyau de métal fondu, refroidi, assure la soudure.
Épaisseur de pièces > ≃ 2 mm : un effort complémentaire de compression assure le forgeage de l'assemblage.
Le temps de soudage court, obtenu par la forte intensité, évite la déformation des pièces et la détérioration des électrodes.

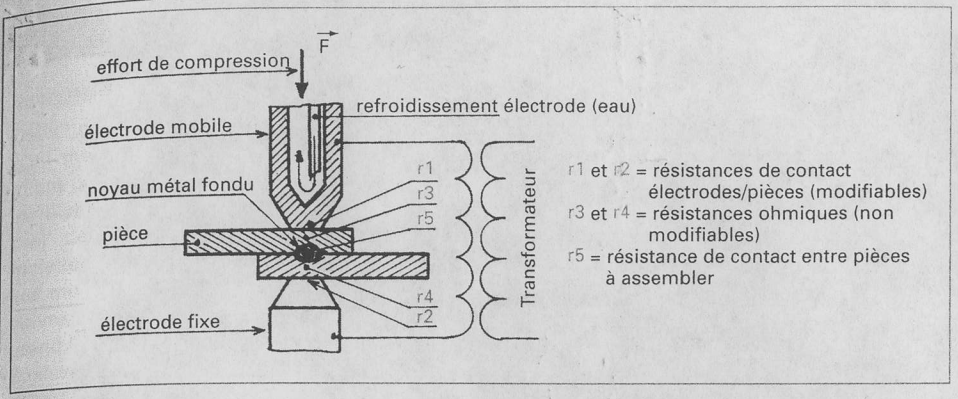


FIGURE 2.47 Schéma de la zone de soudage par points.

Électrodes

Leur extrémité est adaptée au matériau et à l'épaisseur à souder pour assurer : le passage de la densité de courant nécessaire ; la résistance mécanique du point sous l'effort de compression.

Soudage des aciers

Extrémité des électrodes coniques avec un diamètre au sommet
d = 2e + 3 mm si e ≤ 8 mm, et + 2 mm si e > 8 mm, avec e = épaisseur d'une pièce à assembler (fig. 2.48 a).

Soudage des alliages d'aluminium

Extrémité des électrodes sphérique : contact électrode/pièce réduit (fig. 2.48 b).

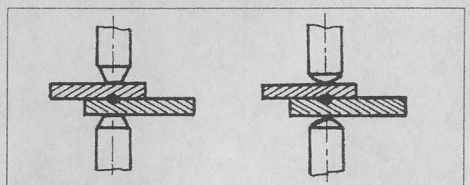
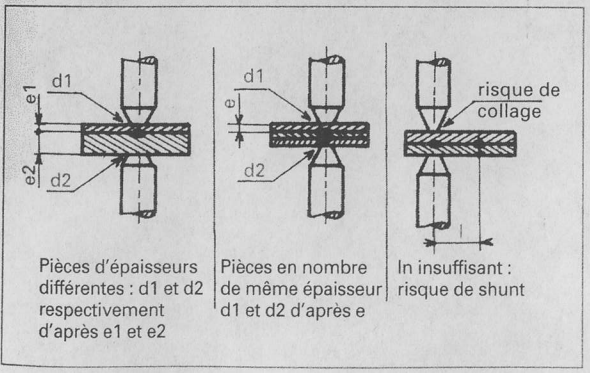


FIGURE 2.48 Extrémités de contact des électrodes.

Mise en œuvre

Différence d'épaisseurs des deux pièces à assembler : à limiter au rapport d'environ 1/3.
Diamètre au sommet des électrodes : en rapport avec chaque épaisseur de pièce (fig. 2.49).



Épaisseur totale soudable :
≃ 20 mm, pour pièces de même épaisseur.
Plusieurs pièces peuvent être soudées ensemble, simultanément.

FIGURE 2.49 Différents cas de soudage par points.

Pas d'espacement

Distance minimale à respecter (la dérivation du courant provoque le collage pièce/électrode) (fig. 2.50).
Distance entre points ≃ 10 E avec E = épaisseur totale à souder ;
Distance point/bord de pièce ≃ 3E.
Aciers inoxydables : possibilité de réduire le pas.
Alliages d'aluminium, cuivre, assemblage de plusieurs pièces : augmenter le pas (≃ 20 %).

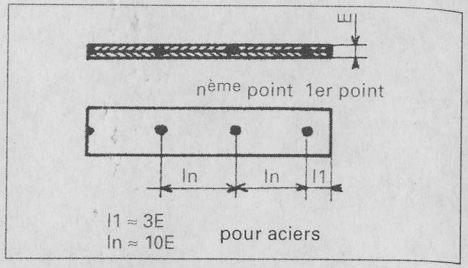
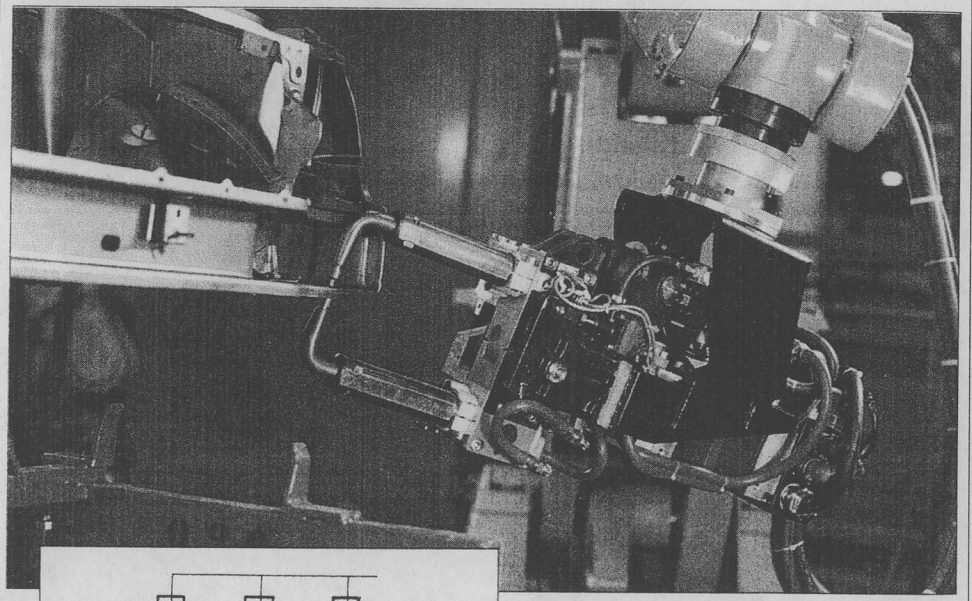


FIGURE 2.50 Espacement des points de soudure.

Utilisation

Assemblage de pièces peu épaisses (tôlerie) de formes quelconques, en travaux unitaire et de série.
Soudage en série de pièces minces en acier : possible en multipoints (fig. 2.51).
Les machines à souder, mono ou multipoints, sont fixes.
Appareils portatifs pour soudage sur grands ensembles métalliques et chantiers.
Robots de soudage pour grande série (chaîne d'assemblage) ou système de soudage en flexibilité.



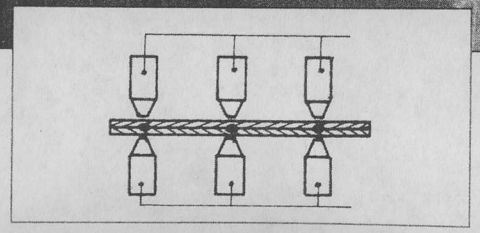


FIGURE 2.51 Station de soudage robotisée
Doc. ARO SA
et schéma de soudage multipoints.

1.14 Soudage à la molette

Généralités

Deux molettes-électrodes, animées d'un mouvement de rotation, provoquent une soudure continue (à points jointifs) ou discontinue (à points espacés) des pièces situées entre les molettes (fig. 2.52).
Les molettes, en cuivre ou alliage de cuivre, ont un diamètre relativement grand (≃ 300 mm).
Épaisseur totale des pièces à souder (de même épaisseur chacune) : ≃ 6 mm maxi.
L'assemblage obtenu est étanche.

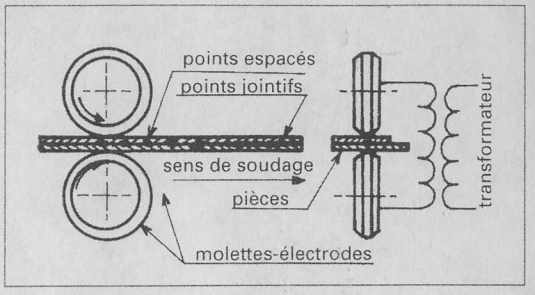


FIGURE 2.52 schéma de zone de soudage à la molette.

Les points de soudure sont discontinus ou continus, selon : la vitesse de rotation des molettes ; la fréquence des impulsions du courant.
Méplat sur la périphérie des molettes-électrodes : d'autant plus large que les pièces à souder sont épaisses (l'effort de compression et l'intensité augmentent).
Vitesses de soudage : 1 à 40 mètres/min, selon l'épaisseur et le type de pièces à assembler (données machine).

Utilisation

Assemblage de pièces de faible épaisseur : quelques centièmes de mm à ≃ 4+4 mm maxi.

Pièces plates

Les deux molettes opposées et tournantes provoquent le soudage en points plus ou moins rapprochés, jusqu'à la soudure en continu.

Pièces tubulaires (longues)

La pièce à souder peut être maintenue en pression bord à bord par des galets. Les deux molettes provoquent le soudage en continu avec écrasement des bords (fig. 2.53).

Soudage bord à bord

Avec apport de deux bandes métalliques minces (quelques dixièmes de mm) placées sur le joint, entre les molettes (de largeur adaptée aux bandes) ; ou avec un fil d'apport situé sur le joint, sous une molette (fig. 2.54).

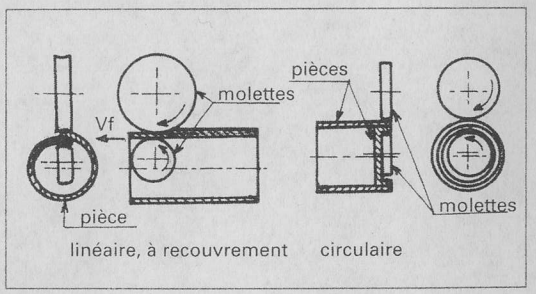


FIGURE 2.53 Schéma de soudage à recouvrement par molette.

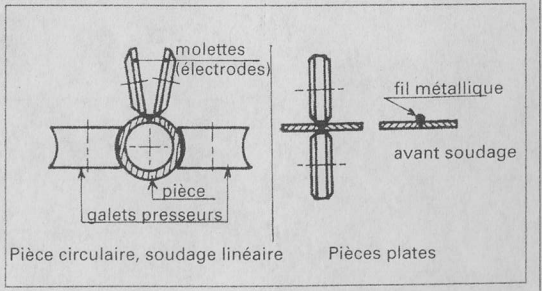


FIGURE 2.54 Schéma de soudage bord à bord.

1.15 Soudage par bossages

Généralités

Assemblage par pression des pièces à assembler entre deux plaques-électrodes provoquant la soudure simultanée de tous les points préalablement définis par des bossages sur une des deux pièces (fig. 2.55).
Le courant est concentré sur les bossages qui s'écrasent sous leur échauffement et disparaissent en formant le point de soudure.
Les points de contact des électrodes, définis par les bossages, permettent de situer les pièces en position, réduisant l'énergie nécessaire.
Épaisseurs différentes des pièces à assembler: les bossages sont à effectuer sur la pièce la plus épaisse (réduit le déséquilibre de chauffage).
Effort de forgeage. Le double de celui du soudage par points pour assurer écrasement et assemblage.
Différentes préparations de pièces. Selon forme des pièces à assembler: plat/cylindre, picot/trou, pièce épaulée/plaque ou tube (fig. 2.56).

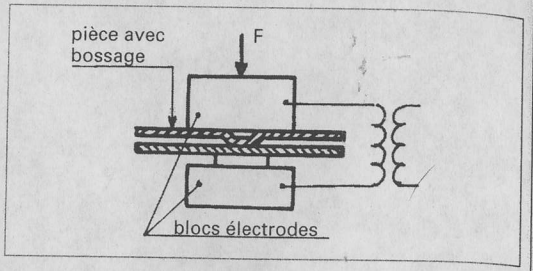


FIGURE 2.55 Schéma de zone de soudage par bossage.

Utilisation

Assemblage, en travaux de série, des pièces d'épaisseur très faible (quelques dixièmes de mm) à ≃ 6 mm maxi, pour des intensités de courant de soudage plus faible que par points ou à la molette (fig. 2.57).

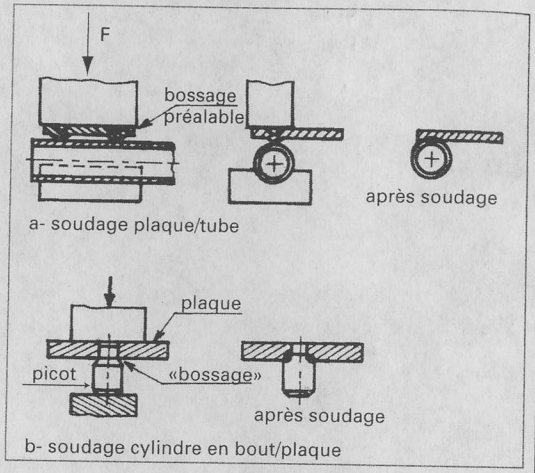


FIGURE 2.56 Schéma de soudage par bossage.

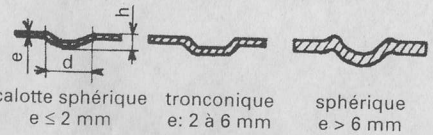


FIGURE 2.57 Formes de bossages et ordre de grandeur des dimensions.

Épaisseur pièce e (mm)	Hauteur bossage h (mm)	Diamètre point d (mm)
0,2 à 0,5	0,5	2,5
0,5 à 0,8	0,7	3,5
0,8 à 1,5	1	4
1,5 à 2	1,2	4,5
2 à 3	1,5	5,5
3 à 5	1,7	6
5 à 7	1,8	7

1.16 Soudage par étincelage

Généralités

Soudage bout à bout, les pièces à assembler faisant électrodes sont accostées sous pression axiale provoquant la fusion des sections en contact, avec étincelage (fig. 2.58).
Les bouts à assembler, bruts de découpe, ont des aspérités provoquant un accostage progressif.
Au premier contact, les aspérités fondent sous la surcharge électrique, provoquant des cratères; ce processus continue jusqu'au contact total des deux bouts à souder.
Les gaz dégagés chassent l'air ambiant, empêchant la contamination de la soudure.
Pression de contact.
Avant coupure du courant: amorce le soudage du métal en fusion.
Après coupure du courant, la pression axiale de forgeage (5 à 25 daN/mm^2) provoque la soudure des deux pièces avec une diminution de longueur (quelques mm).
Sections maximales soudées bout à bout: ≃ 120 cm^2, de pièces en section et résistivité pouvant être différente.

Utilisation

Assemblage de pièces axiles, généralement brut de découpe, en matériaux et sections identiques ou non.

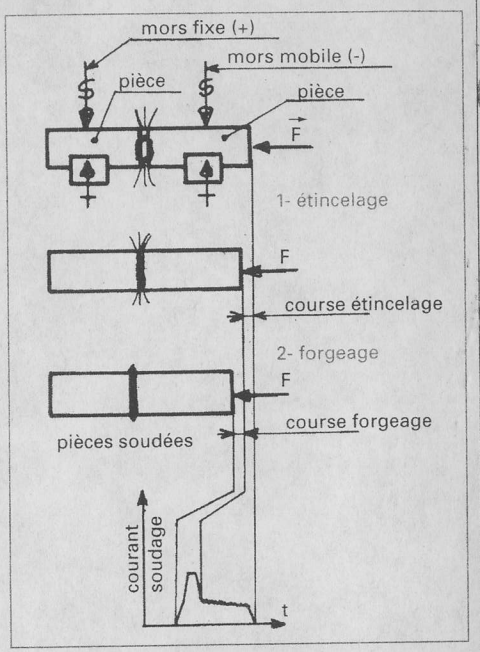


FIGURE 2.58 Cycle de soudage par étincelage.

1.17 Soudage par résistance-étincelage

Généralités

Soudage bout à bout, les pièces faisant électrodes, avec alternance de chauffe par effet Joule et par étincelage, limitent la puissance électrique consommée (fig. 2.59).
Pièces de sections différentes. Éviter la formation de criques par:
– réduction plus grande section égale à plus petite section; ou plus petite section maintenue dans le mors mobile (fig. 2.60).

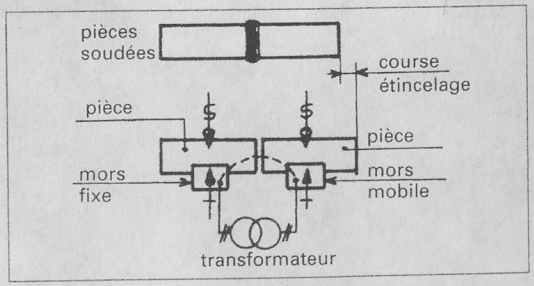


FIGURE 2.59 Schéma de zone de soudage par résistance-étincelage.

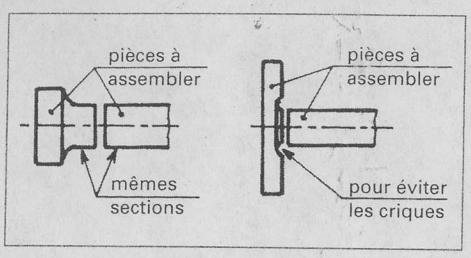


FIGURE 2.60 Pièces à assembler par résistance-étincelage.

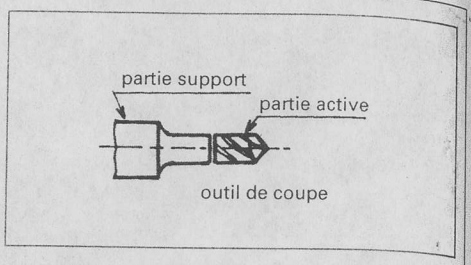


FIGURE 2.61 Soudage de deux matériaux différents.

Pièces de conductibilité différente. Maintenir dans le mors mobile, la moins conductible.
Sections maximales soudées : ≃ 60 cm², avec des intensités de 10 000 à 40 000 ampères et sous des efforts de 1 500 à 40 000 daN.

Utilisation

Assemblage de pièces : de matériaux différents (aciers inoxydables, galvanisé, étamé, non alliés...) ; de forte section : ne devant pas subir de chocs thermiques (fig. 2.61).

1.18 Soudage par arc tournant

Généralités

Soudage en bout, où les extrémités des deux pièces à assembler sont chauffées par un arc électrique qui se déplace circulairement autour de la surface de contact, avec un champ magnétique créé.
À l'état pâteux, les pièces sont soudées en forgeage, par une forte poussée axiale.

Utilisation

Assemblage de pièces de matériaux différents (comme en soudage par friction).

1.19 Soudage par friction

Généralités

Soudage en bout, où, après contact des extrémités de pièces à assembler, la température de soudage est obtenue par friction avec un mouvement de rotation (80 à 150 m/min) d'une des deux pièces (ou les deux), transformant l'énergie mécanique de frottement en énergie calorifique.
Une poussée axiale provoque la soudure par forgeage, après arrêt (brutal) de la rotation.
La longueur totale des pièces est réduite (4 à 5 mm), le refoulement provoquant un bourrelet circulaire (fig. 2.62).
Le bourrelet peut être éliminé par usinage sur la machine à souder (production de série).
Temps de soudage. Très rapide : 3 à 12 secondes, selon les matériaux, avec accostage (1 à 3 secondes) ; chauffe par friction (1 à 5 secondes) ; forgeage (1 à 4 secondes).

Précisions obtenues

Les pièces étant maintenues efficacement : coaxialité 0,1 à 0,4 mm, indexation 0,5 à 0,10 degré.
Qualité de soudure : saine, sans inclusions, de caractéristiques mécaniques équivalentes aux pièces assemblées (pas de fusion de métal, grain affiné par forgeage).

Matériaux soudables

La plupart des métaux et alliages métalliques.
Les deux pièces à assembler peuvent être de matériaux différents.
Pièces longues (câbles...) : Soudage avec une bague intermédiaire recevant le mouvement de rotation (fig. 2.63).

Section des pièces

Sections de jonction cylindriques, pleines ou tubulaires.
Diamètres soudables de quelques mm à ≃ 200 mm.
Une des deux sections, au moins, sera cylindrique à la jonction.
Elles peuvent être différentes, mais il est préférable qu'elles soient identiques (par épaulement) (fig. 2.64).

Utilisation

Assemblage de pièces avec position angulaire non nécessaire, soit : pièces en matériaux différents ne pouvant pas être soudés avec d'autres procédés (fig. 2.65). (Acier non allié/acier rapide, acier inoxydable/titane, aluminium/cuivre...) ; pièces très longues (câbles...) ; pièces tubulaires (tubes de forage...).

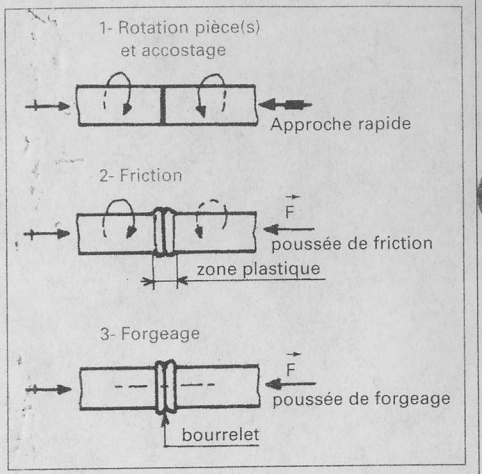


FIGURE 2.62 Cycle de soudage par friction.

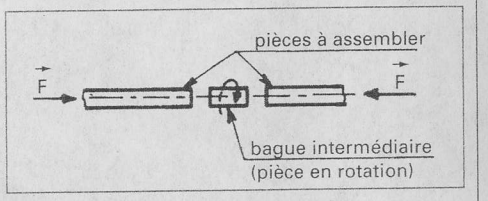


FIGURE 2.63 Soudage de pièces longues.

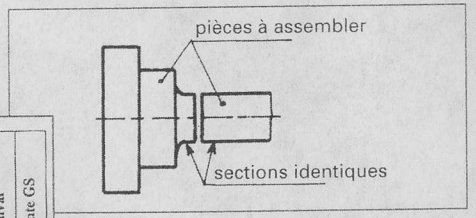


FIGURE 2.64 Exemple de soudage de pièces de sections différentes.

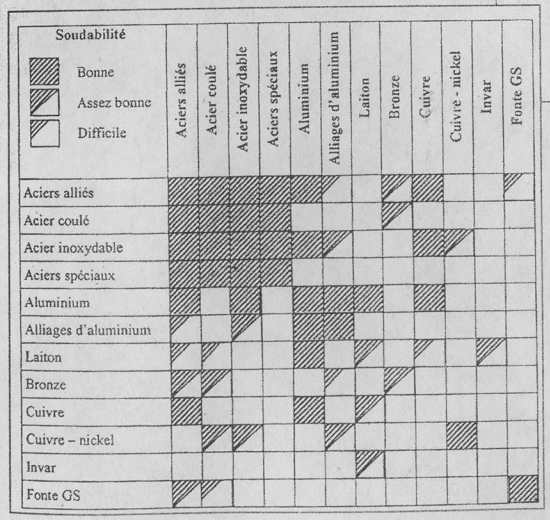


FIGURE 2.65 Soudabilité par friction de différents matériaux.

Machines

Les machines étant spécifiques, la production est effectuée en travail de série.
Machines de soudage inertiel. Réalisation de soudures à fibres orientées en spirale.
On utilise l'énergie cinétique d'un volant, avec arrêt naturel progressif de la rotation (volant d'inertie).

1.20 Soudage par explosion

Généralités

Assemblage par une déformation plastique considérable qui se produit à l'interface des pièces, suite à la détonation d'une charge explosive provoquant une onde de choc qui projette une pièce sur l'autre (fig. 2.66).
La déformation plastique obtenue prend une forme ondulée en vagues de 0,1 à 0,5 mm, assurant l'assemblage par accrochage mécanique.
Un début de fusion peut être atteint sous l'échauffement provoqué par le choc.
La force de plaquage est supérieure à 300 daN/cm^2.

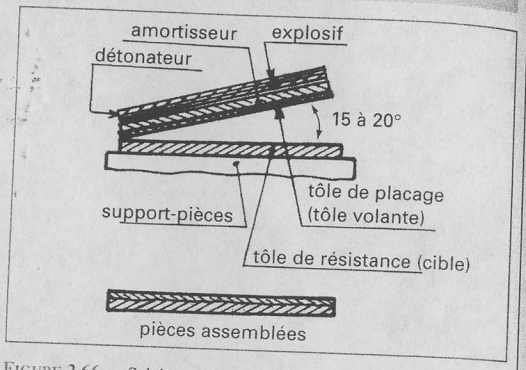


FIGURE 2.66 Schéma de soudure par explosion de pièces plates.

Explosif

Il peut être concentré au-dessus de la tôle à plaquer, ou constitué d'une feuille plastique d'explosif placée sur l'amortisseur.

Qualité de l'assemblage

Elle dépend tout particulièrement de la vitesse de propagation de l'onde de choc : elle doit être suffisamment grande (exemple : supérieure à 225 m/s pour l'aluminium) et inférieure à la vitesse du son dans la cible.

Pièces à assembler

Elles ne seront pas oxydées pour obtenir un assemblage sain.
La pièce à plaquer sur celle de base reçoit la charge explosive, protégée par un amortisseur en plastique, (manchon dans pièce tubulaire à plaquer ; plaque couvrant la surface de la pièce à plaquer).
Cette pièce, la tôle volante, est plane, généralement inclinée (15 à 25°) sur la pièce réceptive, la tôle de base.

Utilisation

Assemblage de tôles, bi ou tri-métalliques : de grandes dimensions, en matériaux différents (obtention de conditions spécifiques d'utilisation : rigidité et anticorrosion avec aluminium/acier, etc.).
Assemblage de tubes sur des pièces métalliques en matériaux identiques ou différents avec rapidité ; zone non affectée thermiquement (fig. 2.67).

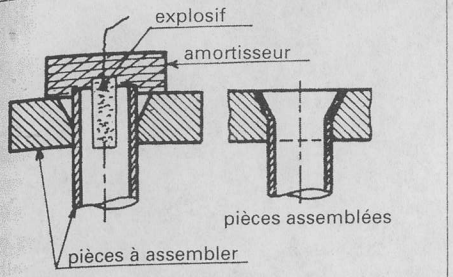


FIGURE 2.67 Schéma de soudage de pièce plate avec pièce tubulaire.

1.21 Soudage par ultrasons

Généralités

Assemblage par vibrations ultrasonores dans la zone de jonction des pièces à assembler, provoquant des frictions avec déformations plastiques localisées et interpénétration moléculaire (griffage intermoléculaire) (fig. 2.68).
L'énergie transmise par la pièce au contact de la sonotrode, à la pièce inférieure en appui sur l'enclume, se transforme en chaleur.
La température s'élève et provoque la liaison des deux pièces (analogie au soudage par friction).
La fréquence des ultrasons est égale ou supérieure à 20 000 hertz.
La transmission s'effectue à une vitesse variant avec la célérité du matériau.

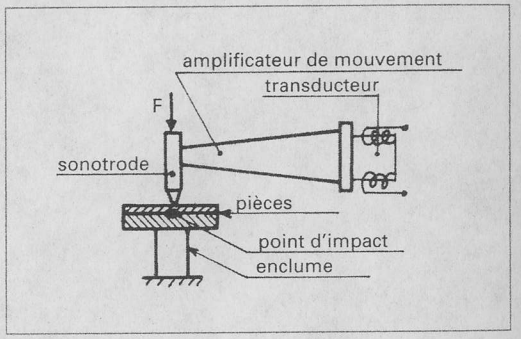


FIGURE 2.68 Schéma simplifié de soudage par ultrasons.

Le ventre des vibrations se situe à l'interface des deux pièces à assembler, où s'engendre un système d'ondes stationnaires.

Sonotrode

De forme adaptée aux pièces à souder, elle doit être à la même fréquence de résonance du système électro-acoustique.

Enclume

Sur laquelle repose la pièce inférieure ; placée en opposition à la sonotrode, elle doit être massive pour agir en déflexion des ondes.

Générateur haute fréquence

Permet au convertisseur électro-acoustique (transducteur et amplificateur) de fonctionner à amplitude constante.
Un supplément de puissance du générateur compense la diminution d'amplitude qui se crée au contact sonotrode/pièce.

Transducteur

Du type piézo-électrique avec céramique ayant un point de Curie élevé.

Amplificateur de mouvement

Généralement de forme bicylindrique, donnant l'amplitude la plus élevée.

Utilisation

Les pièces à assembler doivent être propres (exemptes de graisse).
Assemblage : principalement des feuilles métalliques de faible épaisseur (2 mm maxi) ; de matériaux identiques ou différents et d'épaisseurs très différentes ; de matériaux très réfractaires, non soudables par les autres procédés ; de matières plastiques : inserts métalliques dans pièce en plastique (voir chapitre « Plasturgie »).

1.22 Soudage par faisceau d'électrons

Généralités

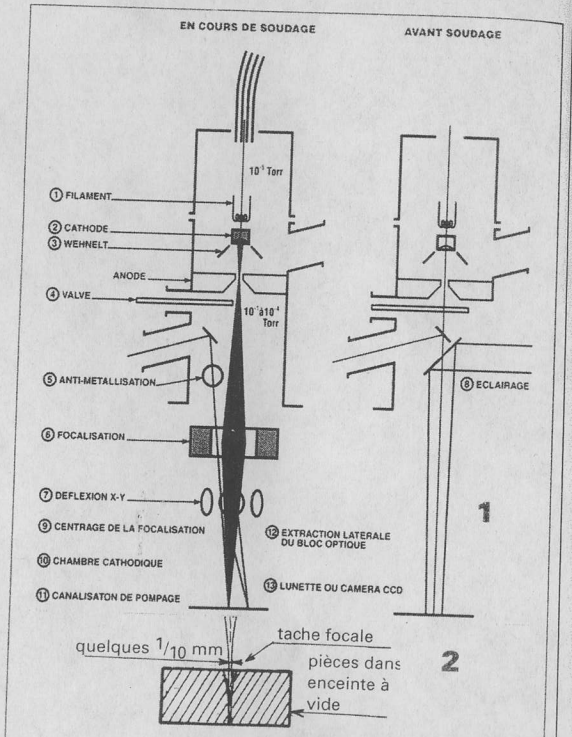
Assemblage par conversion de l'énergie cinétique en énergie thermique d'un faisceau d'électrons accélérés sous haute tension et focalisés au voisinage des pièces à assembler (fig. 2.69).

Canon à électrons

Constitué d'un système cathode-anode qui, porté à haute température dans un vide poussé, crée l'effet thermoïonique dégageant un nuage d'électrons.
Un vide secondaire de 10^{-5} torr est assuré dans l'émetteur (anode-wehnelt-cathode) ; dans la chambre de soudage régnera un vide de 10^{-2} à 10^{-5} torr (obtenu en quelques secondes).

Effet thermoïonique

Provoque la vaporisation instantanée du matériau avec finition d'un trou capillaire qui se remplit du métal en fusion avec le déplacement du faisceau, produisant la soudure après solidification.
L'apport d'énergie étant plus rapide que son évacuation par conduction, de la matière se volatilisant est interceptée par le faisceau, créant un cratère tapissé de métal liquide.



1- champ électrostatique (vide secondaire 10^{-5} torr)
2- champ électromagnétique (vide 10^{-2} à 10^{-3})

FIGURE 2.69 Schéma de canon de soudage par faisceau d'électrons.
Doc. TECHNÉTA

La pénétration maximale est atteinte lorsque l'énergie du faisceau est absorbée par le plasma qui se forme dans le cratère.

Cathode

En tantale-tungstène, chauffée indirectement (par effet Joule) ou directement.
Produit avec l'anode, le champ électrique accélérant les électrons qui sont précipités sur les pièces à souder par un trou situé dans l'anode.
Un wehnelt polarisé négativement conforme le champ électrique et accélère les électrons sortant de l'anode au positif.

Faisceau d'électrons

Focalisé sur les pièces à souder par des lentilles magnétiques : produit une grande concentration de puissance et provoque la fusion des pièces à la zone d'impact.
Des bobines de déflexion, par champ magnétique, dirigent le faisceau et régulent la zone d'impact.
Le joint de soudage obtenu est fin : la visée est très précise (caméra, écran TV, etc.).

Caractéristiques des soudures

De grande qualité (très saines), le soudage s'effectuant sous vide. Contraintes thermiques et déformations très réduites ; zone affectée thermiquement étroite (limite l'échauffement à la soudure).
Le joint présente un renflement à l'impact.

Profondeur

Elle peut être importante et varie selon : la position du soudage ; la focalisation ; la vitesse de soudage (fig. 2.70).

Soudage à plat

Pénétration maxi 150 mm : limite causée par le métal en fusion au fond du cratère (par son propre poids).

Soudage en corniche

Pénétration maxi 500 mm : le métal en fusion n'est pas entraîné au fond du cratère par son propre poids.

Focalisation

Étant maximale, avec augmentation de la puissance, la pénétration l'est également jusqu'à une limite (fig. 2.71).

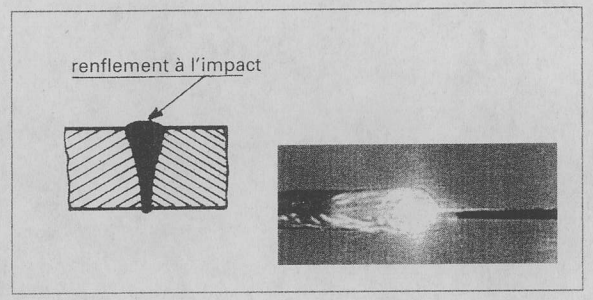


FIGURE 2.70 Soudage par faisceau d'électrons.
Doc. TECHNÉTA

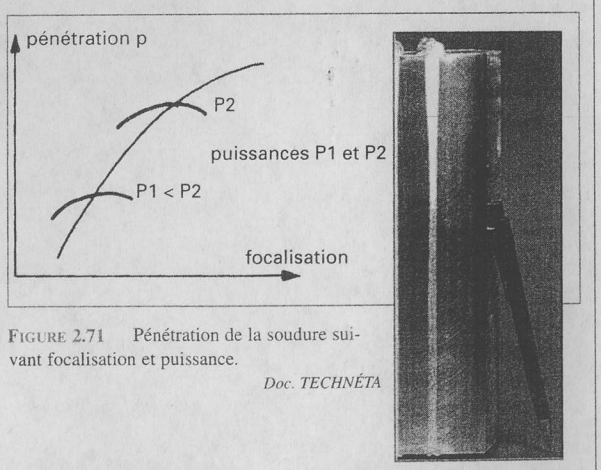


FIGURE 2.71 Pénétration de la soudure suivant focalisation et puissance.
Doc. TECHNÉTA

Vitesse de soudage

Diminuant, la pénétration tend vers une limite minimale (fig. 2.72).

Matériaux soudables

La plupart des métaux et alliages.

Soudage en particulier: les alliages s'oxydant facilement; des matériaux réfractaires.

Alliages composés d'éléments volatils (fontes, zinc etc.) sont à écarter (inclusions gazeuses dans le joint): soudage avec canon à pulsations évitant sa pollution.

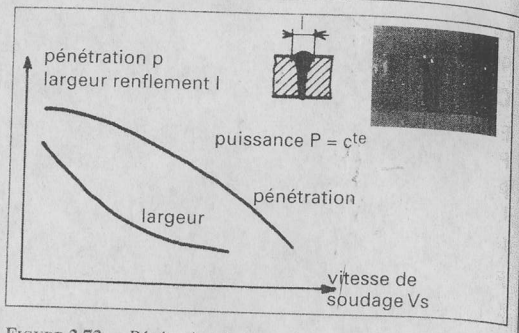


FIGURE 2.72 Pénétration de la soudure suivant la vitesse de soudage.
Doc. TECHNÉTA

Mise en œuvre

Soudage généralement en une passe, sans métal d'apport, en bord à bord, sans jeu de positionnement (0,5 mm maxi).

Un fil d'apport peut être amené pour remplissage d'un chanfrein.

Passe de lissage. Réalisée en défocalisant le faisceau: réduction de défauts de surface.

Surfaces à souder. Doivent avoir: bords à angle vif; exemption d'impuretés (oxydation, huiles).

À assembler après préparation (sous huit heures maxi).

Pièces

Pièces et outillages en matériaux magnétiques: à démagnétiser avant soudage (rémanence 1 gauss maxi).

Pièces soudées peu déformées à la localisation du faisceau: assemblage de pièces préalablement usinées qualité ≃ 10 et Ra 3.2).

Vitesses de soudage

Elles sont rapides (100 mm/min à plusieurs m/min).

À très grande vitesse, la section fondue est plus faible et le refroidissement plus rapide (risque de criques).

À vitesse trop faible, la zone affectée thermiquement est plus large (fig. 2.73).

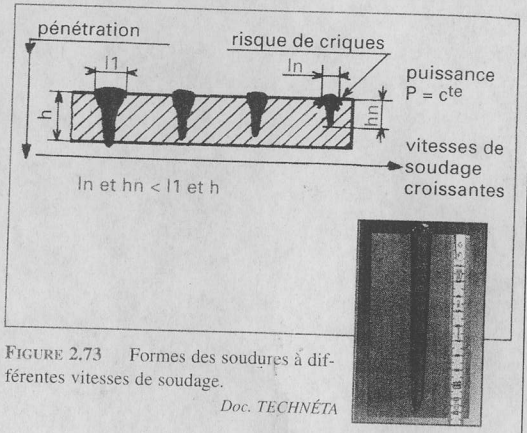


FIGURE 2.73 Formes des soudures à différentes vitesses de soudage.
Doc. TECHNÉTA

Utilisation

En production de série, assemblages permanents très divers, difficilement réalisables avec d'autres procédés de soudage (fig. 2.74).

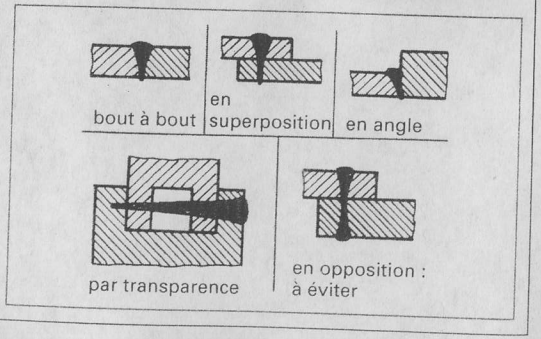


FIGURE 2.74
Différentes soudures produites par faisceau d'électrons.

Machines

Unités de production, pour utilisation en grande série (électroménager, etc.) et de qualité maximale.

Elles comprennent: le canon à électrons, une enceinte de soudage sous vide où sont installées les pièces mobiles sous le faisceau.

Appareillage de vibrations du faisceau: pour effectuer éventuellement des soudures élargies.

Puissance des machines: jusqu'à 200 kW pour grosses unités de soudage.

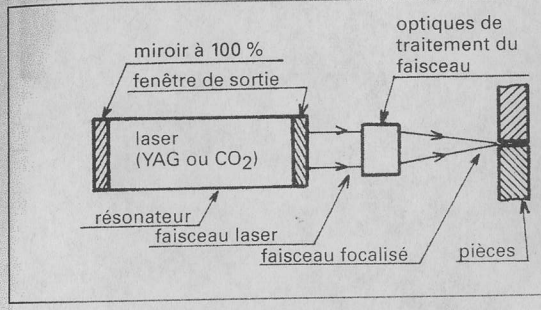
Sécurité

Nécessite des verres au plomb pour hublots de surveillance (protection des opérateurs contre les rayons X).

1.23 Soudage au laser

Généralités

Focalisation d'un faisceau de lumière cohérente produisant une densité de puissance suffisante pour obtenir un bain de fusion et la jonction au refroidissement du bain, sans apport (fig. 2.75).



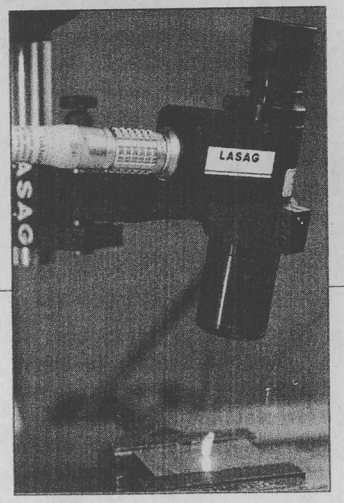


FIGURE 2.75 Schéma de principe des lasers de soudage
Doc. LASAG-Industrial-lasers

Le faisceau laser est transmis dans l'atmosphère, à distance de plusieurs mètres sans être affaibli.

Il peut être dévié (par miroir ou fibre optique).

La focalisation dépend: de la longueur d'onde λ de la focale de la lentille f, du diamètre du faisceau D avant focalisation (fig. 2.76).

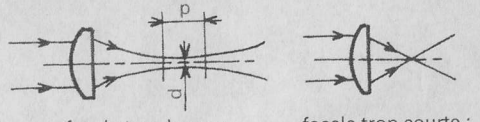


FIGURE 2.76
Focalisation du faisceau de lumière.

La lumière laser est réfléchie, en partie, par le matériau qui la reçoit ; le rayon, absorbé ou réfringent, produit la fusion.
Le taux d'absorption du matériau varie suivant : la longueur d'onde du faisceau ; la température du matériau (fig. 2.77).
Les forts gradients de température et de pression communiquent, sur une faible largeur : des transferts de chaleur aux pièces, engendrant la formation d'un étroit cordon de soudure.
La pression de vapeur dans la cavité produit un bourrelet superficiel sur le cordon (fig. 2.78).
La zone affectée thermiquement est réduite : peu de déformations et de contraintes résiduelles ; diminution de fissurations à froid.

Matériaux	YAG	CO_2
Aciers non alliés	35	6
Aluminium	25	3
Cuivre	9	2
Tungstène	31	4
Verre	5	94
Papier	25	95

FIGURE 2.77 Taux d'absorption de quelques matériaux.

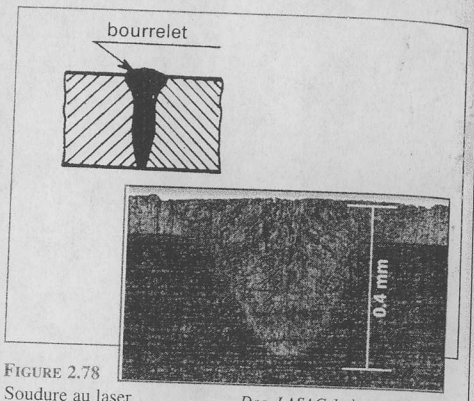


FIGURE 2.78 Soudure au laser. *Doc. LASAG-Industrial-lasers*

Gaz de protection

Argon ou hélium, il protège : le bain de la contamination, la lentille de la tête de soudage.
Il doit être difficilement ionisable, agissant dans la création du plasma avec des vapeurs métalliques produites par le faisceau laser.
Il peut également avoir une influence sur la pénétration du faisceau.

Plasma

Fait écran autour du bain de fusion, empêchant toute l'énergie d'atteindre les pièces (fig. 2.79).

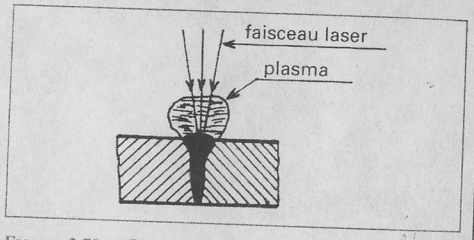


FIGURE 2.79 Plasma localisant l'énergie.

Soudabilité du matériau

Elle est fonction de : sa conductibilité thermique, sa température de fusion, son opacité en phase vapeur ; le coefficient d'absorption du faisceau.
Le cordon de soudure est obtenu par conduction ou par pénétration en fonction de la puissance du faisceau laser.

Soudage par conduction

Avec des puissances inférieures à 1 kW, la pénétration de chaleur dans les pièces se fait par conduction thermique, l'énergie du faisceau étant absorbée à la surface de la pièce.

Soudage par pénétration

Avec création d'un trou de serrure de diamètre équivalent à celui du faisceau focalisé (analogie avec la soudure par faisceau d'électrons) : la profondeur de pénétration du faisceau laser est ≃ 10 largeur du cordon de soudure (zone fondue) (fig. 2.80).

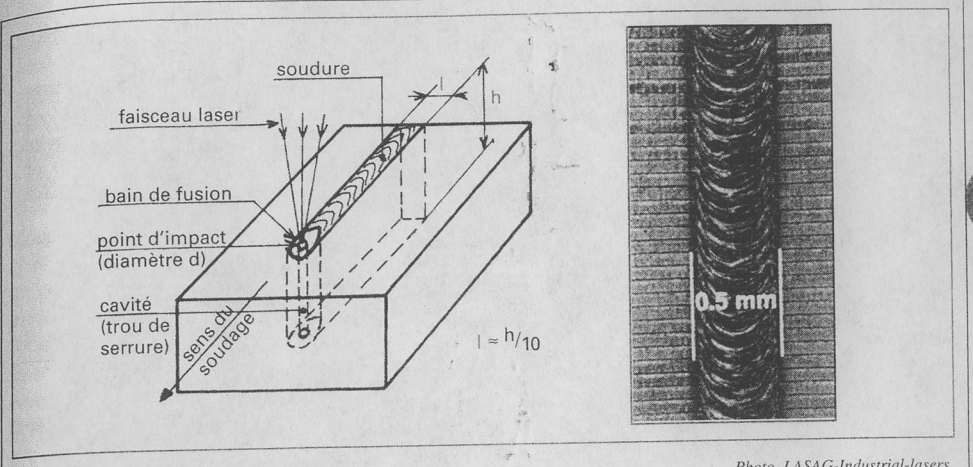


FIGURE 2.80 Cordon de soudure au laser. *Photo. LASAG-Industrial-lasers*

Matériaux soudables

Ceux assemblés par fusion, avec les caractéristiques de faisceau à haute densité d'énergie : aciers non et faiblement alliés, inoxydables, titane, alliage d'aluminium, de cuivre, etc.
Matériau ayant une certaine teneur en gaz dissous : risque de fissuration à chaud, la soudure pouvant être poreuse (le bain n'a pas suffisamment de temps pour totalement dégazer, la vitesse de refroidissement étant élevée).

Lasers de soudage

De deux types : à solide YAG, à gaz CO_2.

Laser à solide YAG

Il fonctionne en mode continu ou en mode pulsé avec un rendement de 5 % maxi.
La source laser irradie les pièces pour atteindre la température de fusion.
Le pompage optique du barreau YAG est obtenu par un flash de lumière blanche de forte puissance, émettant dans le proche d'infrarouge (la longueur d'onde est de 0,7 à 1,06 µm).
L'énergie fournie par impulsions est favorable au soudage par points (fig. 2.81).
La vitesse de passage du faisceau produit une faible épaisseur de cordon.

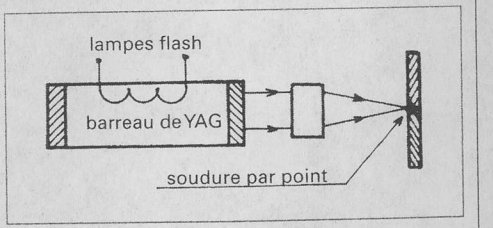


FIGURE 2.81 Schéma des lasers YAG.

Mode continu

La puissance maximale est faible (environ 1 500 watts).

Mode pulsé

La puissance de crête peut atteindre jusqu'à 20 kW par excitation discontinue du milieu actif (fréquence des pulsations maxi 500 hertz).

Laser à gaz CO_2

Il fonctionne en principe en mode continu, ou en mode pulsé.
Le pompage électrique d'un milieu gazeux actif (mélange de CO_2, d'hélium et d'azote) est d'un très bon rendement (15 % maxi) : obtention de fortes puissances (fig. 2.82).
La longueur d'onde, dans l'infrarouge, est de 10,6 µm.

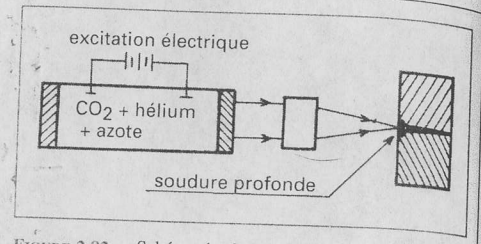


FIGURE 2.82 Schéma des lasers CO_2.

Mise en œuvre

Jeu entre pièces à la jonction, inférieur à la tache focale (0,2 à 0,4 mm) : selon épaisseur des pièces, quelques centièmes à quelques dixièmes de mm (fig. 2.83).

Pièces

Exemptes de graisses et d'oxydes.
État de surface régulier pour conserver la même réflexion de la lumière laser.
Assemblage : de différentes méthodes (bord à bord, point à point) ; en toutes positions (faible largeur de la zone fondue et solidification rapide (fig. 2.84).

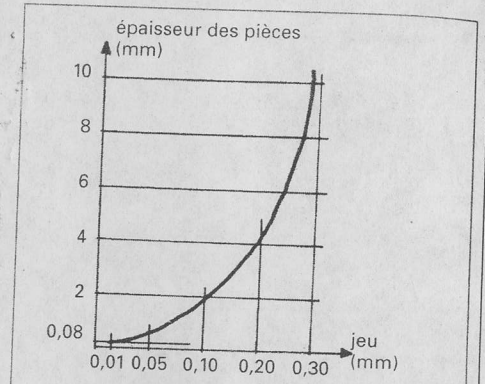
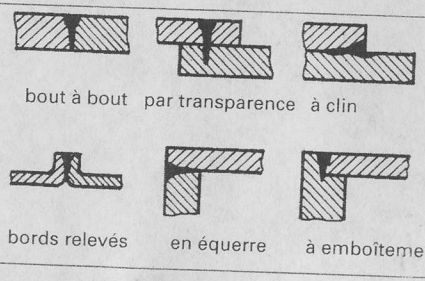


FIGURE 2.83 Jeux de soudage des pièces.



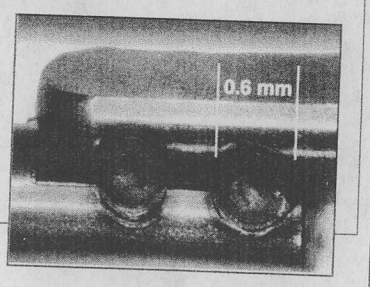


FIGURE 2.84 Différentes soudures par laser. *Photo LASAG-Industrial-*

Vitesses de soudage

Elles sont rapides.
Laser CO_2 ≃ 40 m/min maxi, soudage en une passe jusqu'à 25 mm d'épaisseur avec 20 kW de puissance.
Laser YAG ≃ 400 mm/min maxi.

Utilisation

Laser YAG pulsé. Assemblage permanent avec précision, de pièces de faible épaisseur (quelques dixièmes de mm à quelques mm) devant subir un minimum de contraintes.

Soudage en continu, bord à bord et point à point (énergie par impulsions).
Laser CO_2 continu. Assemblage permanent, à grande vitesse (et fortes puissances) de pièces épaisses, en continu, bord à bord et par transparence.

Machines de soudage

Possibilité de dévier le rayon pour souder : à distance (quelques mètres) ; à des endroits peu accessibles ; en plusieurs endroits simultanément par division du faisceau.
Déviation du faisceau. Par miroir (laser CO_2) ou par fibre optique (laser YAG) (fig. 2.85).
Opération annexe. La découpe, en particulier, peut s'effectuer sur la machine.

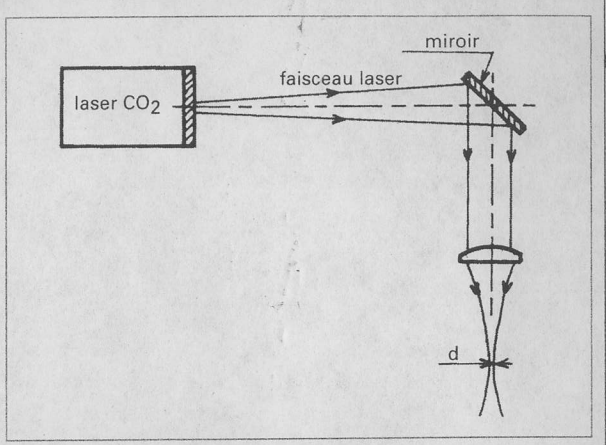


FIGURE 2.85 Schéma de déviation du faisceau laser (CO_2).

Sécurité

Le rayon laser est dangereux pour les yeux des opérateurs : lunettes de protection spécifiques impératives.

2. Procédés d'assemblage par adhésion

2.1 Généralités

Collage de deux pièces assurant un assemblage permanent pouvant supporter des charges aussi importantes que par les autres procédés d'assemblage.
Type d'assemblage normalisé NF. T 76.001/011.

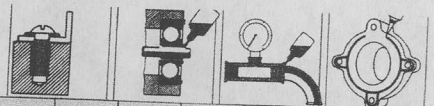
2.2 Classification des colles

Classement par familles ayant des caractéristiques spécifiques de performances d'adhésion, en fonction des différents types d'assemblage (en bout, en équerre...).

Principales familles de colles

Les acrylites, les cyanoacrylates, les époxydes, les silicones: de caractéristiques différentes, elles sont d'utilisation spécifique.
Exemple de différentes colles cyanoacrylates (fig. 2.86).

Guide de sélection



Matériaux \ WEICON Contact	VA 20	VA 8312	VA 100	VA 300	VA 1500	VA 2500 HT	VA 250 Black	Gel	VA 1460	VM 20	VM 120	VM 2000
Métal	+	+	++	+	+	+	+	+	+	++	++	++
Plastiques	++	++	++	++	++	++	++	+	++	+	+	+
Caoutchouc	++	++	++	+	++	++	++	+	++	+	+	+
Elastomères EPDM	+	++	+	+	+	+	+		+			
Bois			+	++	+	+	+	+				
Bois de balsa	+	+	+	+	+	+	+	++				
Verre/Céramique	+		++	++	+	+	+	++	+			
Cuir		+	++	++	++	+	+	++	+			

Approprié (+) Très approprié (++)
Dans le cadre des recommandations susmentionnées, il est possible de coller aussi d'autres combinaisons, p. ex. métaux sur caoutchouc et métaux sur matières plastiques.

WEICON Contact liquide	VA 20	VA 8312	VA 100	VA 300	VA 1500	VA 2500 HT	VA 250 Black	Gel	VA 1460	VM 20	VM 120	VM 2000
Types d'ester	éthyle								alcoxy-éthyle	méthyle		
Constitution	liquide incolore, VA 2500 HT opaque, VA 250 Black noir											
Propriétés	utilisé de préférence pour le collage de matières synthétiques et de caoutchouc					résistance aux hautes-températures, élasticité résiduelle		gel, ne coule pas	presque inodore, sans efflorescence	utilisé de préférence pour coller les métaux		
Viscosité à +20°C (mPa·s) Brookfield	< 20	20-40	60-120	200-300	1000-1500	2000-3000	2000-3000	60000-90000	120-200	20-40	100-130	1700-2000
Poids volumique à +20°C (g/cm³)	1,04	1,05	1,06	1,07	1,08	1,06	1,06	1,08	1,02	1,10	1,10	1,12
Point éclair selon Abel-Pensky DIN 55213 en °C	87											
Adhérence initiale* en secondes sur aluminium [1]	30-60	30-60	30-60	60-90	90-120	40-80	90-120	90-120	30-60	50-70	50-70	70-90
sur caoutchouc d'essai NORA [2]	2-15	2-10	3-20	2-10	5-30	25-50	20-40	20-30	10-60	10-60	10-60	10-90
sur PVC rigide [3]	5-60	5-30	10-60	10-80	10-120	25-100	40-80	40-80	20-150	30-120	30-120	30-150

*Déterminée à +23°C et 50% d'humidité de l'air. Dans les temps indiqués, une résistance de maniement peut être atteinte.

1) Aluminium, Type Al Cu Mg 2pl., non-prétraité
2) Caoutchouc d'essai Nora, poli
3) PVC rigide Trovidur® EN, non-prétraité

WEICON Contact - durci	
Résistance à la température	tous types de -20°C à env. +80°C (à court terme -30°C à +100°C) -- VA 2500 HT et VA 250 Black à +135°C
Secteur de ramollissement en °C	160-170
Indice de réfraction n^{D20}	1,49 (correspond au verre) / non-applicable pour les types VA 2500 HT et VA 250 Black
Résistivité spécifique selon DIN 53482* (Ω mm)	> 10^{15}
Constante diélectrique ε_r à 1 MHz DIN 53483*	5,4
Rigidité diélectrique selon DIN 53481* (KV/mm)	11-13
Solubilité en	Formamide de diméthyle, oxyde sulfonique de diméthyle, nitrile d'acétone, alcalis. Le contact prolongé avec l'ester acétique, l'acétone et le chlorure de méthylène peut faire gonfler la colle durcie.

* Suivant l'exemple de la norme DIN, mesurés sur joints collés

FIGURE 2.86 Caractéristiques et sélection des colles cyanoacrylates Xeicon-contact.
Doc. P.W. Weidling et Sohn, importateur SAFI

2.3 Choix des colles

Nécessité de connaître l'ensemble des contraintes à subir par les pièces assemblées, soit: mécaniques (traction, cisaillement, compression, pelage); thermiques et climatiques d'environnement (température, humidité, nuisances); chimiques (peintures...); d'utilisation (durée de vie, efforts à transmettre, vibrations...).
Choisir une colle de préférence d'un seul composant, à prise rapide en température ambiante.

Colles pour matériaux métalliques

Choisir la colle d'une famille donnée, selon les cas d'utilisation, et en particulier pour matériaux métalliques (aciers, alliages d'aluminium, alliages de cuivre) soit:

Colles époxydes

Pour une bonne résistance mécanique (cohésion, adhésion), pas de retrait, mais sensible aux chocs.

Colles cyanoacrylates

Pour une très bonne résistance mécanique, une bonne résistance aux solvants, mais sensibles à l'eau; à prise instantanée.

2.4 Caractéristiques du collage

Qualité

Fonction du choix optimisé de la colle, de la préparation des surfaces, d'une parfaite mise en œuvre (données technologiques).
Sa résistance dépend de: l'adhésion, force d'adhérence à vérifier par essai mécanique; la cohésion, plasticité plus ou moins grande du joint (fig. 2.87).
L'assemblage est assuré en respectant les données technologiques, soit: grammage, mouillage, temps ouvert, vie en pot.

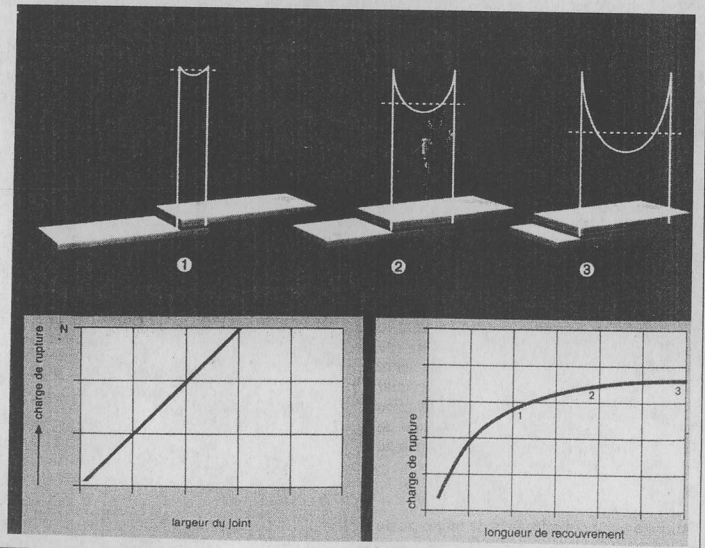


FIGURE 2.87
Comportement mécanique de la colle dans sa masse (cohésion)
Doc. Loctite

Grammage

Donne la cohésion de l'adhésif: c'est le respect de l'épaisseur du joint, pour ne pas modifier les propriétés mécaniques du collage.

Mouillage

Donne l'adhésion de la colle déposée sur une surface: c'est le contact intime pièce/colle (analogie avec les soudures).
L'adhésion est la force interfaciale de liaisons chimiques des deux surfaces assemblées.

Temps ouvert

Permet le mouillage de la pièce non encollée sur celle qui est encollée: c'est le temps passé entre l'assemblage des deux pièces préparées.
Un dépassement de temps ouvert provoque une peau de surface sur la colle, nuisant au mouillage.

Vie en pot

Concerne les colles à bi-composants: à mélanger avant utilisation pour étalement aisé sur la surface à encoller.
C'est le temps disponible entre le mélange effectué et le dépôt de la colle.
Avec dépassement de vie en pot, la colle commence à durcir: l'étalement est difficile et le mouillage moins bon.

2.5 Caractéristiques des assemblages

Il peut être étanche ou isolant.

Surfaces d'adhésion

À concevoir en forme, dimensions, état de surface, pour répondre aux contraintes mécaniques en utilisation.
Vérifier, pour les deux pièces à assembler par recouvrement ou emmanchement: contrainte de traction (perpendiculaire à la surface encollée); cisaillement (parallèle à la surface encollée); éventuellement torsion (assemblages cylindriques) (fig. 2.88 page suivante).
Avec une colle souple, assemblage de bonne résistance à la fatigue.

Joint de colle

Il doit travailler en traction-cisaillement.
À éviter. Pelage, clivage, assemblage de matériaux à coefficient de dilatation différents.
Épaisseur de joint. Incidence sur comportement mécanique du collage (adhésion, cohésion): les performances mécaniques diminuent avec son dépassement d'épaisseur optimale.

Adhésion par recouvrement

Longueur de recouvrement efficace l_o

Se détermine d'après: l'épaisseur S de la pièce la plus mince et d'un facteur de forme f de valeur courante 0,06.
On admet l_o (mm) = $\sqrt{5/0,06}$, valeur limite en deçà de laquelle l'adhésion est considérée comme insuffisante (fig. 2.89).

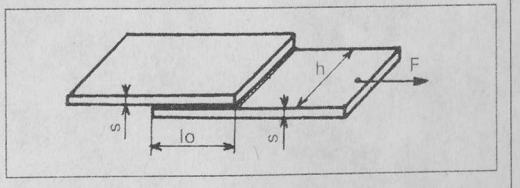
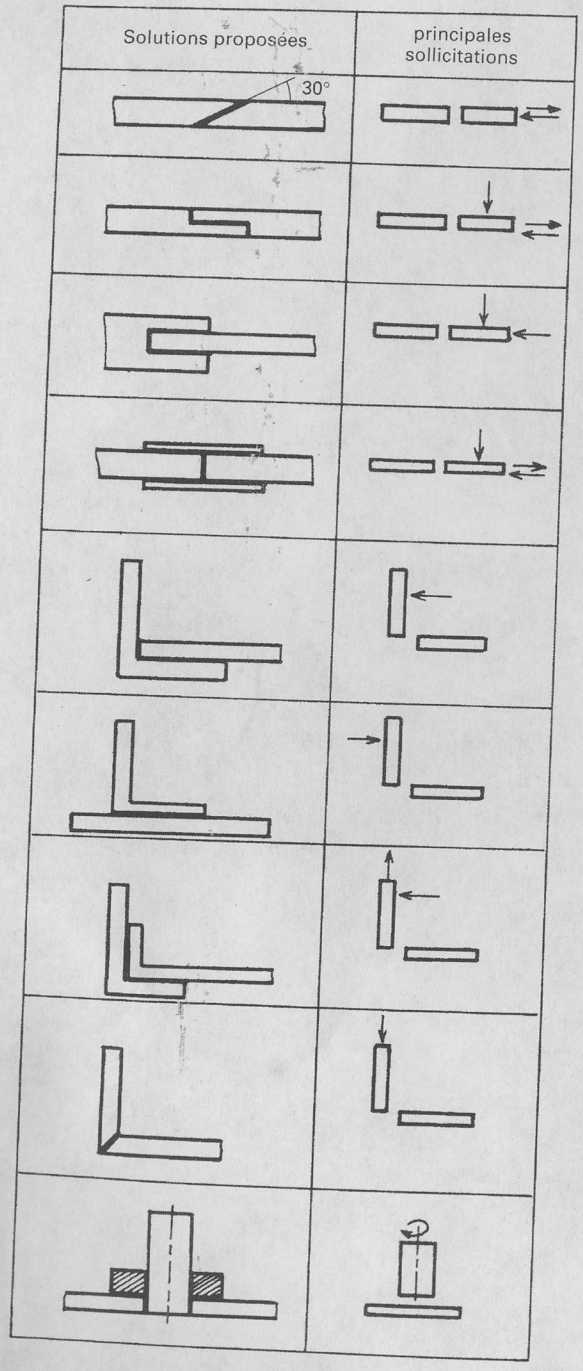
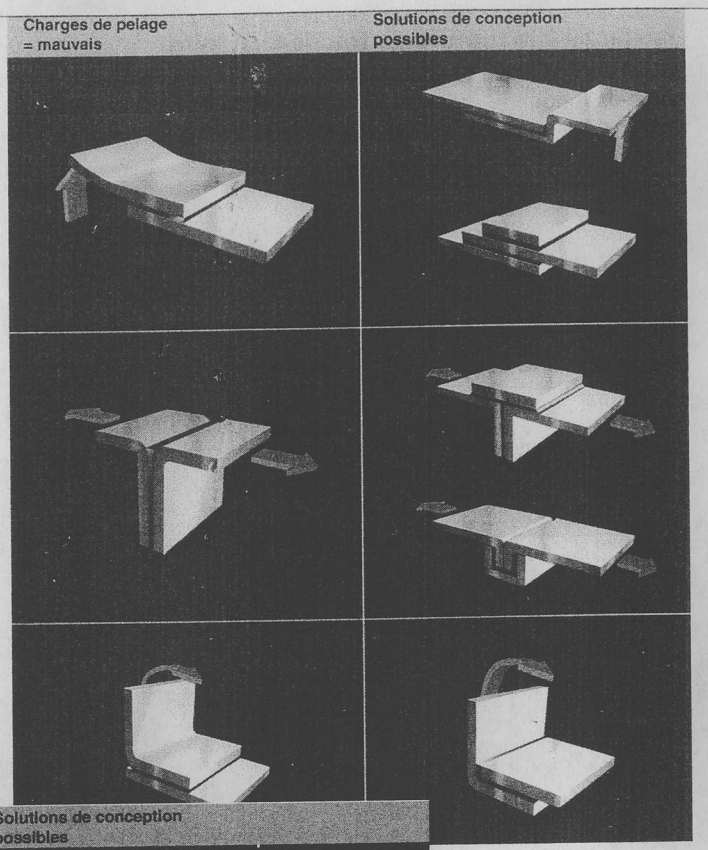


FIGURE 2.89 Recouvrement par collage d'assemblages plans.





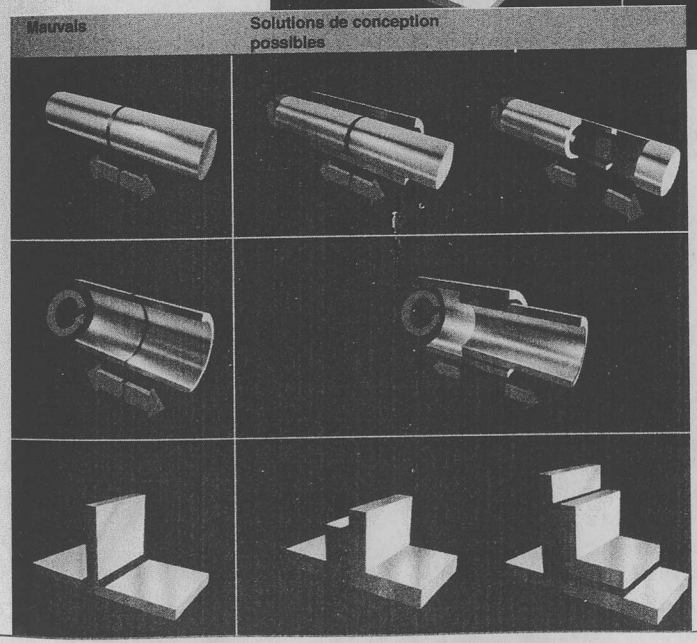


FIGURE 2.88 Différents assemblages par collage
Doc. Loctite

Résistance à la rupture en traction du joint

τ_0(Mpa) = 0,6. τ_r, avec τ_r = caractéristique de la colle utilisée.
Charge de rupture F_{r0} admissible. Pour vérifier si elle est supérieure à la force à laquelle l'assemblage est soumis, soit : $F_{r0}(N) = \tau_{ro}. l_0. h$, avec h = largeur de l'assemblage.

Adhésion par emmanchement

Longueur de recouvrement

Assemblages cylindriques tube/tube ou cylindre (fig. 2.90), prendre $h = \pi D$, avec D (mm) = diamètre d'emmanchement.
Assemblages tube/tube ou cylindre, appliquer l_0 (mm) = $\pi D \tau_r / F$.

Résistance à la torsion

Pour emmanchements $Fr(N) = 2.M_c / D$, avec moment du couple M_c(mm).

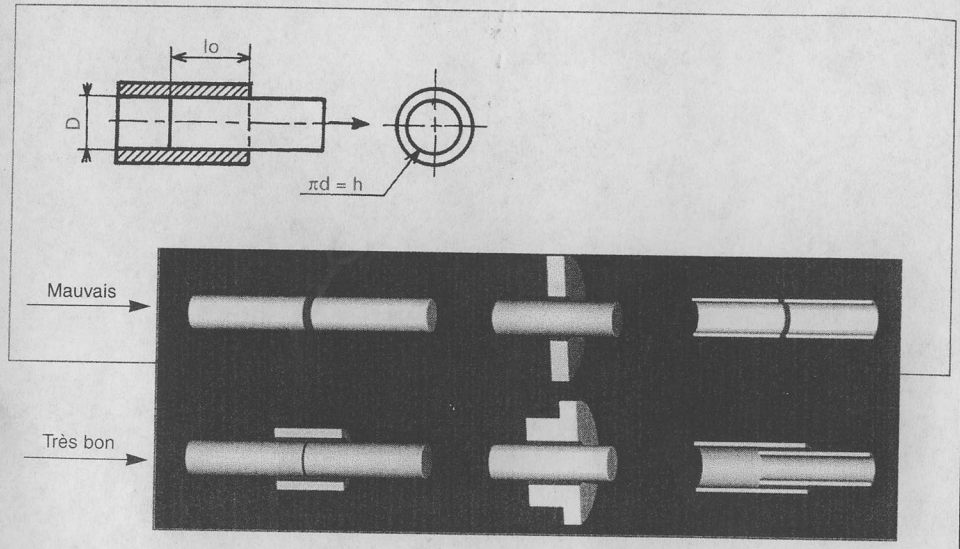
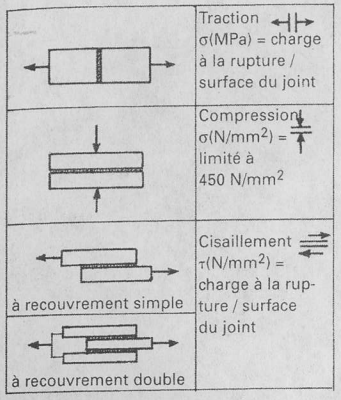
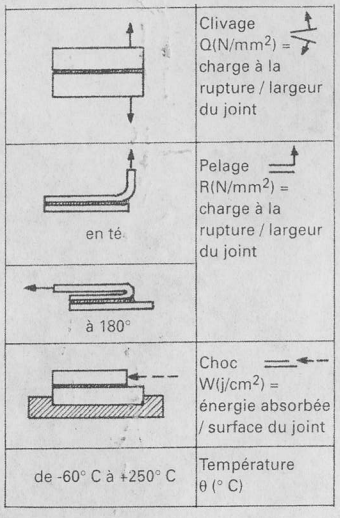


FIGURE 2.90 Recouvrement par collage d'assemblages cylindriques. *Doc. Loctite*

2.6 Essais mécaniques

Le collage nécessite que des essais soient effectués pour vérifier si les contraintes d'utilisation sont respectées.
Les essais mécaniques permettent de vérifier les limites des assemblages par adhésion, en fonction des sollicitations d'utilisation, soit : traction, compression, cisaillement, pelage, clivage.
Également température maxi et mini admises, cohésion (fig. 2.91).
Éventuellement résistances aux chocs et aux solvants.





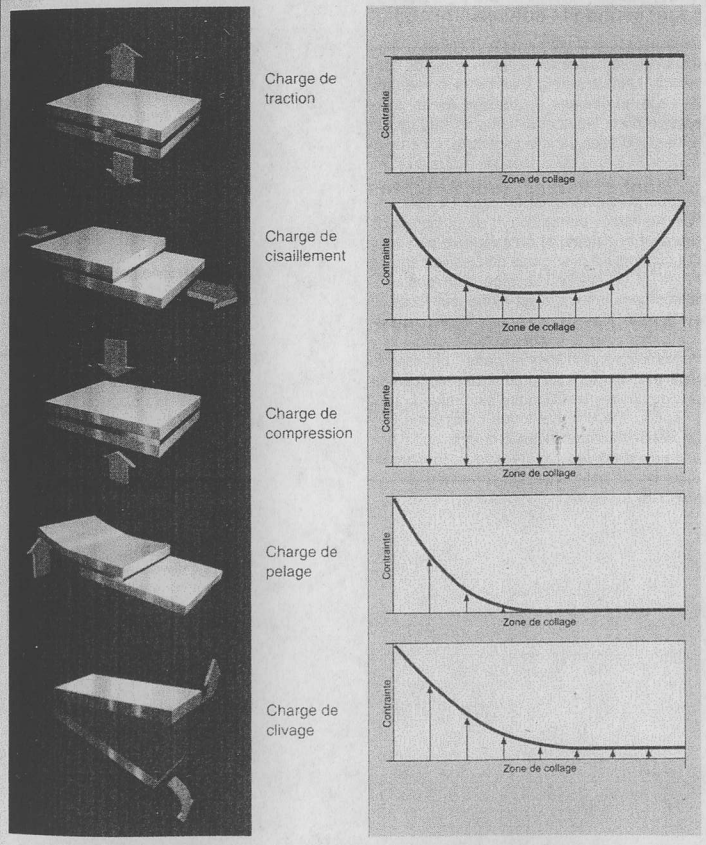


FIGURE 2.91 Essais mécaniques des assemblages par collage et charges les plus courantes avec répartition des contraintes résultantes dans le joint collé. *Doc. Loctite*

2.7 Mise en œuvre

Surfaces à encoller. Impérativement décontaminées (oxydation, graisse...) pour assurer le mouillage.
Encollage. Immédiatement après nettoyage (éviter humidité, poussière...).
Avec dégraissage par produit chimique : collage instantanément après ou application d'une couche de primaire.

Aciers

D'après Topfix : dégraissage au trichloréthylène, sablage ou grenaillage, nettoyage au trichloréthylène ; collage après évaporation.
Ou dégraissage au trichloréthylène, trempe au bain d'acide sulfurique additionné de bichromate de soude (4 %), double rinçage à l'eau bouillante et à l'eau déminéralisée ; collage après séchage.

Alliages d'aluminium

D'après Framusi : dégraissage au trichloréthylène, sablage, dépoussiérage, collage.
Ou dégraissage au trichloréthylène, lessivage (avec une solution spécifique), séchage ; collage.

Alliages de cuivre

Dégraissage au trichloréthylène, lessivage avec une solution spécifique (chlorure ferrique, acide nitrique, eau), rinçage, séchage ; collage immédiat.

2.8 Utilisation

La plupart des matériaux sont collables, indifféremment (métal/bois, métal/plastique...) et d'épaisseurs quelconques.
Les aciers inoxydables sont difficilement collables.
Collage à utiliser : si les contraintes sont certaines ; pour pièces mécaniques «sous-utilisées», à durée de vie non excessive.
À effectuer généralement à température ambiante (avec limites).
Cohésion. Optimale avec respect des conditions de mise en œuvre : temps, température, pression de contact ; durcissement à chaud pour certaines colles (50 à 60 °C).
Opération de collage. S'effectue en manuel, semi-automatique, automatique, selon production-productivité et types de pièces à assembler.

3. Assemblage par rivetage et sertissage

3.1 Rivetage-sertissage par mouvements combinés

Fluage radial de la matière sous un mouvement de frappe rectiligne - alternatif, sans rotation du poinçon (la bouterolle) incliné de quelques degrés et animé simultanément d'une trajectoire circulaire ou en rosette.

Fluage orbital

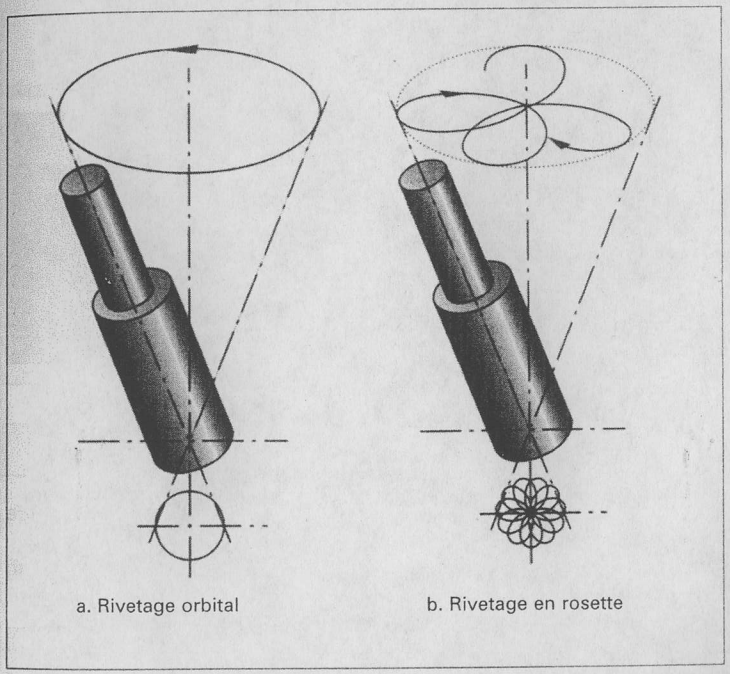
La bouterolle tourne orbitalement (à vitesse rapide) dans son cône d'action (fig. 2.92a).

fluage en rosette

La bouterolle décrit (à vitesse lente) dans son cône d'action, les mouvements en rosette produisant des assemblages de diverses formes (circulaire, carrée...) (fig. 2.92b).

Utilisation

Rivetage et sertissage unitaire à grande série sur pièces pleines ou creuses, picots et soyages, de sections diverses.



a. Rivetage orbital b. Rivetage en rosette

FIGURE 2.92
Principes de rivetage
Doc. Guillemin SA

3.2 Rivetage par autopoinçonnage

Assemblage de pièces minces (tôles) avec rivet inséré sans préperçage, à l'aide d'un outillage standard poinçon-matrice (fig. 2.93).
Le rivet autopoinçonneur, de forme adaptée à la matrice, s'évase dans la pièce inférieure (sans la percer) après avoir traversé la ou les pièces supérieures (fig. 2.94).
L'outillage de rivetage (vérin) peut être équipé d'un presse-flan : assemblage tôles fines.

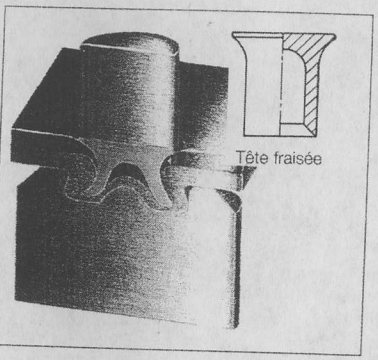


FIGURE 2.93 Schéma de principe de l'autopoinçonnage
Doc. Bollhoff-Otalu SA

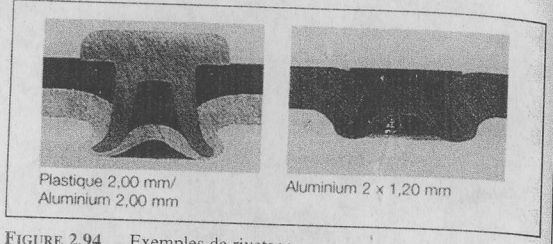


FIGURE 2.94 Exemples de rivetage
Doc. Bollhoff-Otalu SA

Utilisation

Assemblage unitaire à grande série, étanche aux liquides et gaz, sans altération des pièces assemblées (galvanisées, prélaquées, etc.) d'épaisseur totale maxi 6,5 à 11 mm selon matériaux (fig. 2.95).

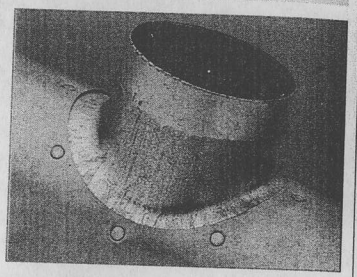


FIGURE 2.95
Exemple de pièce rivetée.
Doc. Bollhoff-Otalu SA

3.3 Sertissage

Assemblage d'écrous (à crantage antirotation) par déformation de l'écrou localisée à l'arrière de la pièce (zone borgne), à partir d'un logement cylindrique ou hexagonal (fig. 2.96).
Utilisation. Dans tous les matériaux sur pièces terminées (revêtues, etc.) de forme plate, en caisson, profilée, avec accessibilité d'un coté, pour vis M10 maxi.

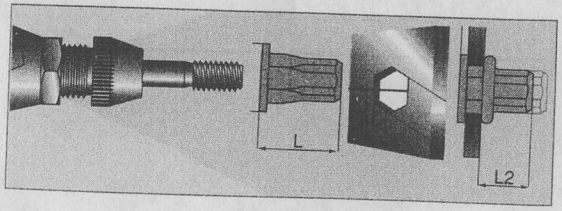


FIGURE 2.96 Sertissage d'un écrou noyé
Bollhoff-Otalu SA . (écrou RIVKLE plus)

3 PROCÉDÉS DE BROCHAGE

1. Généralités 85
   1.1 Mode d'action 85
   1.2 Brochage d'intérieur 85
   1.3 Brochage d'extérieur 86
2. Outils de brochage 86
   2.1 Broches d'intérieur 86
   2.2 Broches d'extérieur 88
   2.3 Denture 88
   2.4 Angles de coupe 90
   2.5 Efforts de coupe 91
   2.6 Précisions obtenues 92
3. Conditions de coupe 92
   3.1 Vitesses de coupe 92
   3.2 Épaisseur du copeau ou progression 92
   3.3 Lubrification 92
4. Mise en œuvre 93
   4.1 Forme des ébauches 93
   4.2 Réduction d'usure des dents 95
   4.3 Autres conditions d'usinage 95
5. Porte-pièce 96
   5.1 Brochage d'intérieur 96
   5.2 Brochage d'extérieur 96
6. Machines 97
   6.1 Mouvement de coupe 97
   6.2 Brochage circulaire 98
7. Utilisation 98
8. Rainurage 99
   8.1 Utilisation 99

1. Généralités

Le brochage consiste à usiner simultanément, avec rapidité et précision, des surfaces parallèles, débouchantes et à directrices rectilignes ou hélicoïdales de formes intérieures et extérieures non limitées par un épaulement.
Les broches, outils de forme, sont constituées d'une série de dents travaillant successivement. Chaque dent a son arête de coupe décalée de la précédente d'une distance de l'épaisseur du copeau (la progression) (fig. 3.1).

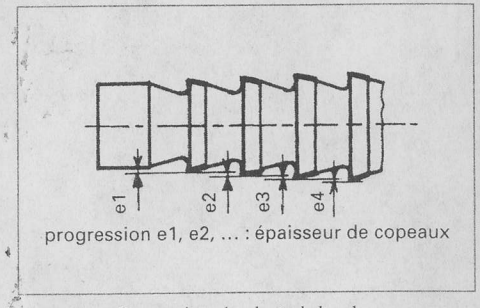


FIGURE 3.1 Progression des dents de broche.

1.1 Mode d'action

L'ensemble des dents génère le profil fini à partir du profil brut, par le passage de la broche, au travers de la pièce (brochage d'intérieur) ou devant la pièce (brochage d'extérieur) suivant le mouvement de coupe rectiligne (il n'y a pas de mouvement d'avance, la profondeur de passe est donnée par la progression).

1.2 Brochage d'intérieur

Le brochage s'effectue par le passage de broche dans le trou d'ébauche.
La broche de type axile est attelée à la brocheuse par la tête de traction. L'effort de coupe plaque et maintient la pièce sur son appui perpendiculaire au mouvement de coupe (fig.3.2). La fixation de la pièce n'est généralement pas nécessaire.

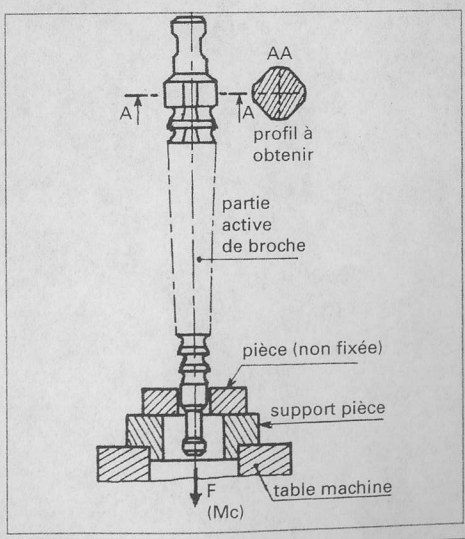


FIGURE 3.2
Schéma de brochage d'intérieur.

1.3 Brochage d'extérieur

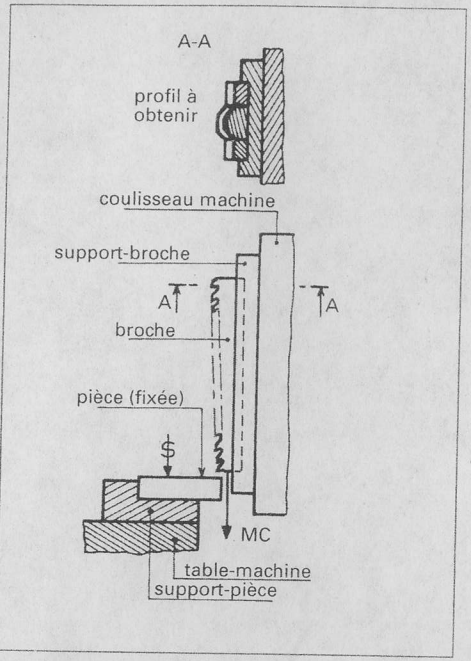


FIGURE 3.3 Schéma de brochage d'extérieur.

La broche, de type prismatique, est fixée au coulisseau de la machine (fig. 3.3).
Le brochage s'effectue généralement à partir de l'ébauche du profil brut (de forgeage, moulage, etc.).
Il est simultané pour un groupe de formes associées sur une pièce ou une grappe de petites pièces (fig. 3.4).
La ou les pièces sont à maintenir efficacement pour s'opposer à la poussée latérale.

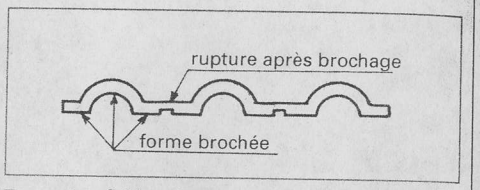


FIGURE 3.4 Schéma de pièces coulées en grappe pour brochage simultané d'extérieur.

2. Outils de brochage

Les broches sont spécifiques à chaque forme à obtenir (cannelures à flancs parallèles et en développante, dentelures rectilignes, rainures de clavetage...).

2.1 Broches d'intérieur

Elles sont constituées de l'attelage, du guide, de la denture, de la queue (fig. 3.5).

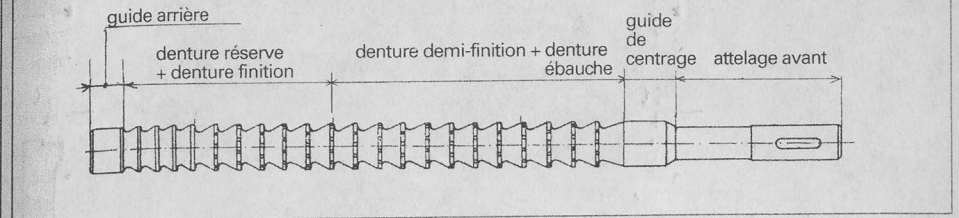


FIGURE 3.5 Conception de broches d'intérieur.

Attelage

De différentes formes, à accrochage manuel ou automatique, de dimensions permettant son passage dans le trou d'ébauche de la pièce (fig. 3.5 et 3.6).

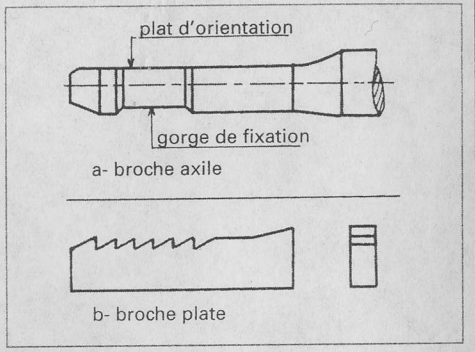


FIGURE 3.6 Schémas d'attelages des broches.

Guide

Assure la mise en position broche/pièce ; son diamètre est inférieur, avec jeu fonctionnel, au trou d'ébauche.

Queue

Permet d'assurer le maintien arrière de la broche en fabrication, affûtage, manutention, stockage.

Denture

Progression de dents, à partir d'une forme cylindrique de départ qui progresse jusqu'à la forme finale du profil à obtenir.
Comprend des dents d'ébauche, de demi-finition, de finition et de réserve fig. 3.5).

Les dents

Sont taillées dans le corps (outil en ARS) ou rapportées (outils en carbure) sur un corps en acier.
Dents d'ébauche. Les arêtes de coupe, pouvant comprendre des brise-copeaux, ébauchent la forme à obtenir.
Dents de demi-finition. Elles profilent la forme désirée.
Dents de finition. D'un nombre réduit à quelques dents, elles calibrent la forme au profil final.
Dents de réserve. Généralement au nombre de cinq, elles sont de la forme du profil final, augmentant la durée de vie des broches, après des affûtages successifs.

2.2 Broches d'extérieur

Un outillage de brochage d'extérieur est constitué d'un groupe de broches élémentaires (pour chacune des différentes formes de pièce) de sections prismatiques, assemblées dans un support prismatique fixé au coulisseau de la brocheuse (fig. 3.7).

Chaque broche élémentaire comprend essentiellement la denture (ébauche, demi-finition, finition, réserve), conçue comme les broches d'intérieur.

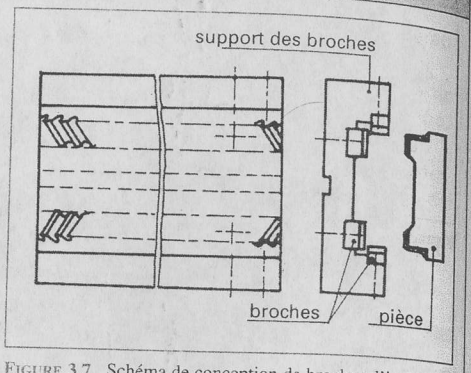


FIGURE 3.7 Schéma de conception de broches d'intérieur.

2.3 Denture

Les **broches d'intérieur**, de type axile, ont une denture annulaire.

Les **broches d'extérieur**, de type prismatique, ont une denture droite ou oblique (fig. 3.8).

La denture oblique permet l'attaque progressive dans la matière, réduisant les risques de rupture de dents.

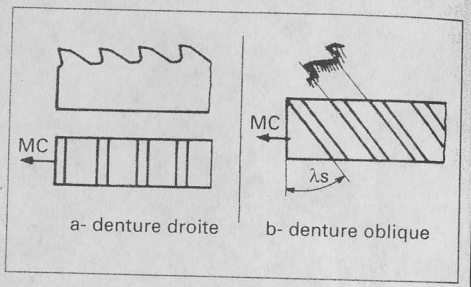


FIGURE 3.8 Schéma de dentures de broches d'extérieur.

Nombre de dents d'une broche

Il est fonction de la surépaisseur totale d'usinage et des épaisseurs de copeaux (profondeurs de passe).

Pour chaque opération (ébauche, demi-finition, finition) on a *n* dents = surépaisseur d'usinage de l'opération/épaisseur du copeau.

On considère, selon la surépaisseur totale d'usinage :

Finition. 2 à 10 dents, pour une surépaisseur d'usinage de 0,05 à 0,1 mm.

Demi-finition. 5 à 15 dents, pour une surépaisseur d'usinage de 0,2 à 0,4 mm.

Ébauche. Le nombre de dents est à déterminer en fonction de la surépaisseur restante, (totale, moins demi-finition et finition) jusqu'au maximum limité par la longueur de broche admise (course de la machine).

Nota : pour une denture nécessitant une longueur supérieure à la course-machine, envisager deux broches, ou une modification éventuelle de la pièce.

Pas de la denture

C'est la distance entre deux arêtes de coupe consécutives. On admet ce pas P en fonction de la longueur à brocher L, avec P = 0.4 L pour L ≤ 16 mm et 1.75 $\sqrt{L}$ pour L > 16 mm.

Inter-dents

Ils doivent permettre de loger les copeaux produits durant le passage de chaque dent dans la longueur brochée (les copeaux s'évacuent après le contact dent/pièce (fig. 3.9).

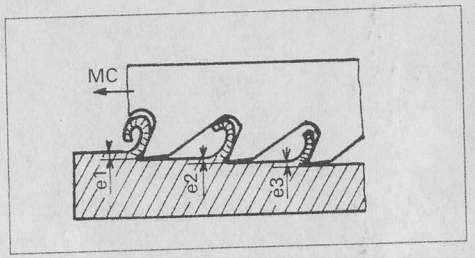


FIGURE 3.9 Logement de copeaux inter-dents.

Section inter-dents

Elle est définie par (fig.3.10) :

La hauteur du logement h = P/3 ; l'angle de contre-dépouille (α' = 30° à 50° ; le rayon de raccordement contre-dépouille/face de coupe suivante r = P/5.

Dents d'ébauche

Vérifier la capacité du logement de copeaux par rapport au volume de copeaux produits pour une dent (assimiler la section de l'inter-dents à un triangle rectangle).

Volume de l'inter-dents Vi : on admet Vi ≥ 3 volumes de copeaux.

Logement de copeaux

Si insuffisant ou hauteur h trop grande (réduisant excessivement la section du noyau de broche) : adopter une denture allongée (fig. 3.11).

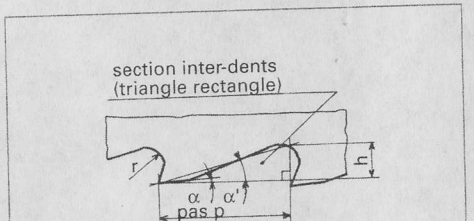


FIGURE 3.10 Section d'inter-dents.

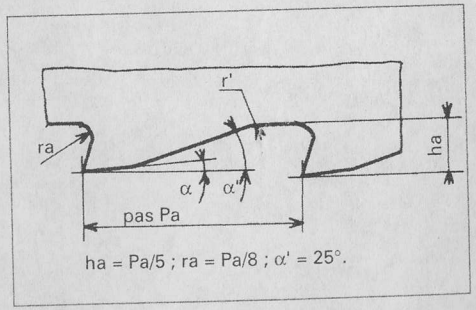


FIGURE 3.11 Section d'inter-dents allongé.

Denture à pas variable

Avec accroissement de 0,1 à 1 mm par dent d'une fréquence de 3 à 5 dents, pour éviter le broutement.

Brise-copeaux

Sur les dents d'ébauche et de demi-finition, ils sont obtenus par des rainures sur les faces de dépouille (fig. 3.12 et 3.13).

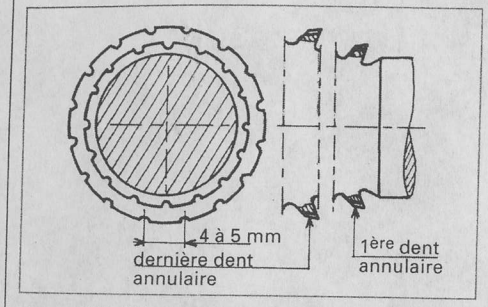


FIGURE 3.12 Brise-copeaux sur dents d'ébauche, broche cylindrique.

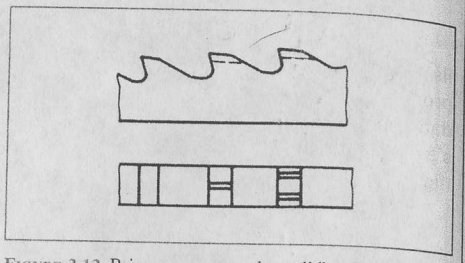


FIGURE 3.13 Brise-copeaux sur dents d'ébauche (alternance des dents).

Témoin d'affûtage

Surface non dépouillée de 0,1 à 1 mm de large. À concevoir sur les faces de dépouille des dents de finition et de réserve : pour affûtages successifs tout en conservant les dimensions du profil à obtenir.

Denture hélicoïdale

Brochage de formes intérieures à directrices hélicoïdales (écrou à pas rapide, cannelures et rainures hélicoïdales...) d'angle maxi 45°, par rotation et translation simultanées de la broche (fig. 3.14).

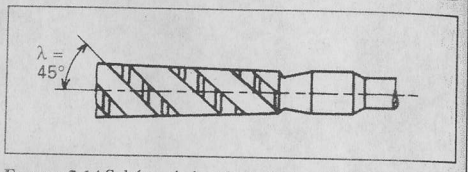


FIGURE 3.14 Schéma de broche à denture hélicoïdale.

2.4 Angles de coupe

Coupe γ_0, et dépouille α_0 (en particulier) sont faibles pour consolider les dents et permettre un maximum d'affûtages (outils de forme, affûtés sur la face de coupe (fig. 3.15 et 3.16).

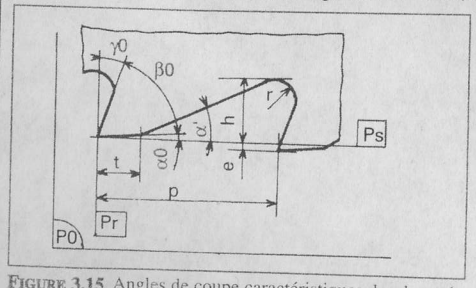


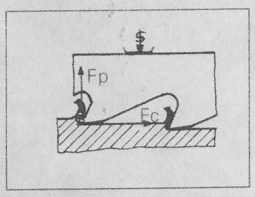
FIGURE 3.15 Angles de coupe caractéristiques des dents de broche.

Matériaux	Dépouille α_0			Coupe γ_0
	Ébauche	1/2 finition	Finition et réserve	
Fontes et aciers	3° à 1°30	0°30 à 1°	0° à 1°	Aciers : 10° à 20° Fontes : 5° à 15°
Alliages légers	3° à 5 °	1° à 3°	0° à 3°	15° à 25°
Laitons et bronzes	0° à 1°	0° à 1°	0°30 à 0°	0° à 10°

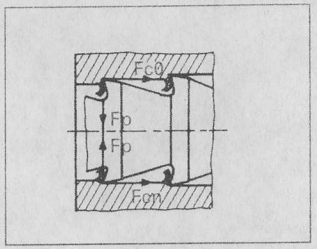
FIGURE 3.16 Ordre de grandeur des angles de coupe γ_0 et de dépouille des dents de broche.

2.5 Efforts de coupe

Efforts appliqués sur l'outil (fig. 3.17), pour une dent.



a – Broche plate



b – Broche cylindrique

FIGURE 3.17 Efforts de coupe appliqués sur une dent de broche.

Effort de refoulement, ou effort de pénétration Fp

Il s'équilibre sur la dent opposée (broche d'intérieur) ou sur son support (broche d'extérieur).

Effort tangentiel, ou effort de coupe Fc

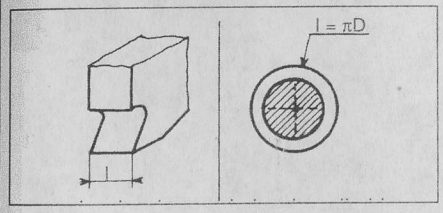
$$Fc = S \cdot K_a \cdot z$$

avec

S (mm^2) = section du copeau en ébauche (largeur brochée $l \times$ progression e) ;

z = nombre de dents en travail simultanément ;

K_a = pression spécifique de coupe daN/mm^2 (fig. 3.18).



a – Broche plate *b – Broche cylindrique*

Matériaux	K_a daN / mm^2		
	e < 0,1	e = 0,1 à 0,25	e ≥ 0,3
Aciers R < 90	360	260	190
Aciers R ≥ 90	470	360	250
Aciers au chrome	520	380	270
Fontes grises, GS	300	200	150
Bronzes	340	240	180
Laiton	160	110	80
Alliages d'aluminium	140	100	70

FIGURE 3.18 Pressions spécifiques de coupe en brochage (ordre de grandeur) et définition de *l*.

Vérification rigidité de la broche

L'effort de traction de la brocheuse Ft, doit être suffisant. Il faut Ft > Fc.
La section minimale du noyau de broche Sn doit supporter, sans se rompre, l'effort de traction. Il faut Ft < Rp. Sn, avec Rp = Résistance pratique ou charge unitaire (≃16 daN / mm^2).

Nota : L'effort maximal de traction admissible est gravé sur chaque broche.

Puissance utile de brochage

$Pu_w = Fc \cdot Vc / 60$, avec Vc = m/min.

2.6 Précisions obtenues

Dimensionnelle : qualité 6, exceptionnellement 5.
État de surfac : 0,8 Ra, exceptionnellement 0,4 Ra.

3. Conditions de coupe

3.1 Vitesses de coupe

Elles sont faibles pour éviter une rupture et une usure prématurée des dents de la broche. Selon les matériaux à brocher, elles varient de 2 à 50 m/min, la meilleure durée de vie d'outil étant recherchée (fig. 3.19).
Le temps d'usinage est court, la forme à obtenir étant réalisée durant la course aller de la broche (longueur maxi environ 1,50 m).
Les vitesses de retour de broche sont de 10 à 50 m/min.

Matériaux	Broches	
	Acier rapide	Carbure
Aciers R < 90	2 à 12	12 à 50
Aciers R ≥ 90	2 à 8	8 à 40
Aciers au chrome	2 à 6	6 à 30
Fontes grises, GS	2 à 10	10 à 30
Alliages d'aluminium	5 à 15	15 à 50
Bronzes - Laitons	3 à 8	8 à 30
V_c. Selon complexité du profil et longueur à brocher.		

FIGURE 3.19 Vitesses de coupe recommandées en brochage.

3.2 Épaisseur du copeau ou progression

C'est la différence dimensionnelle entre deux dents consécutives. Elle est de 0,01 à 0,5 mm, en fonction de chaque opération (ébauche, demi-finition, finition) et du matériau à usiner (fig. 3.20).
La progression sera constante pour l'ensemble des dents d'une broche devant effectuer essentiellement une opération de finition.

Matériaux	Épaisseur du copeau *e*		
	Ébauche	Demi-finition	Finition
Aciers R < 90	0,08 à 0,30	0,05 à 0,02	0,02 à 0, 01
Aciers R ≥ 90	0,05 à 0,20		
Aciers au chrome	0,04 à 0,15		
Fontes grises, GS	0,08 à 0,30	0,10 à 0,05	
Bronzes – Laitons	0,08 à 0,20	0,20 à 0,05	
Alliages d'aluminium	0,10 à 0,40	0,20 à 0,08	0,05 à 0,02

FIGURE 3.20 Épaisseurs de copeaux recommandées en brochage.

3.3 Lubrification

Elle doit être abondante, avec une huile de coupe entière, visqueuse, adhérente, fortement anti-soudure et anti-usure : elle doit assurer au maximum la protection des arêtes de coupe et l'obtention d'un état de surface de qualité.
Brochage de formes longues : l'huile de coupe soluble assure l'évacuation des calories.

4. Mise en œuvre

4.1 Forme des ébauches

Face d'appui de la pièce

Elle doit être perpendiculaire au mouvement de coupe.
À usiner avant brochage pour assurer un appui plan.

Formes de section cylindrique (alésages débouchants)

Les ébauches sont obtenues à partir d'un trou qui sera :

Cas général

Obtenu par perçage, moulage de précision, calibrage en forgeage.

Grande série

À partir d'un trou moulé ou forgé, les broches utilisées auront des dents d'ébauche de section polygonale (hexagonale...), décalées angulairement les unes des autres.
(fig. 3.21).

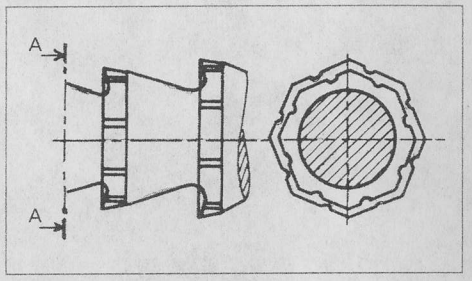


FIGURE 3.21 Dents d'ébauche de broche d'alésage de trous brut de forgeage et moulage.

Petite série

Trou alésé à une cote de demi-finition avant brochage (finition) avec une broche à denture essentiellement de finition et de réserve.

Matériaux non ferreux, ductiles

Obtention des alésages de précision avec une broche comportant des dents de calibrage (travaillant par refoulement) (fig. 3.22).

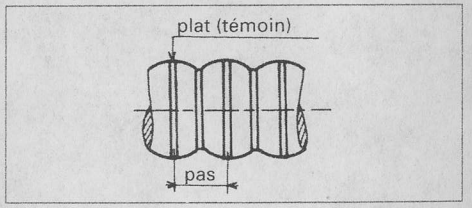


FIGURE 3.22 Dents de calibrage pour matériaux ductiles.

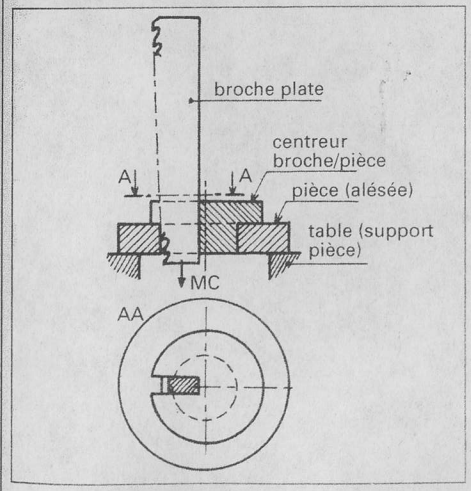


FIGURE 3.23 Schéma de brochage d'une forme complémentaire à un alésage usiné.

Alésages avec rainure

Ils sont généralement obtenus en deux phases : alésage – ou brochage – de la forme alésage ; brochage de la rainure avec une broche plate maintenue dans un centreur pour petites séries (fig. 3.23), ou à section triangulaire avec portées cylindriques.
En petites séries, plusieurs rainures pouvant être brochées, rainure par rainure, la pièce est fixée sur un porte-pièce diviseur.

Formes polygonales

Elles sont brochées à partir d'un trou d'ébauche, avec une broche à denture en coupe alternée, de préférence oblique.

Alésages cannelés (centrage sur cercle extérieur)

Les formes sont obtenues avec des broches différentes selon l'importance des séries, à partir de l'alésage usiné en finition ou demi-finition.

Grande série

À partir de l'alésage usiné en demi-finition (ou brut précis) avec deux types de broches :
Avec dents d'ébauche et de finition alternée (circulaire et cannelée).
Avec dents associées, l'avant de la broche pour l'alésage et l'arrière pour les cannelures.

Moyenne et petite série

À partir de l'alésage usiné en finition – par alésage ou brochage. La réalisation des cannelures s'effectue avec une broche cannelée (fig. 3.24).

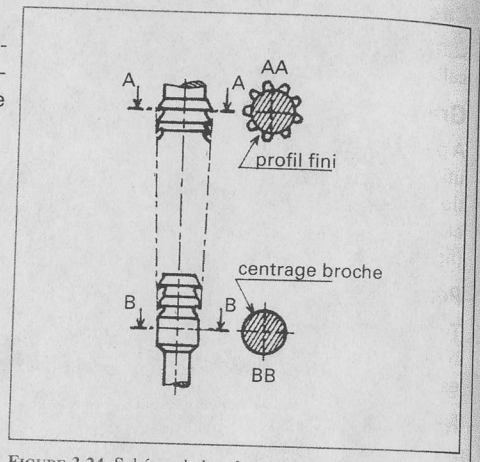


FIGURE 3.24 Schéma de broche d'usinage de cannelures.

Longueur à brocher

Il faut toujours au moins deux dents en travail simultanément pour éviter la variation des efforts de coupe (pouvant provoquer le broutement et la détérioration des arêtes de coupe, voire la rupture de broche).

Longueur à brocher trop faible

Empiler plusieurs pièces pour les brocher ensemble ou utiliser une broche à denture oblique.

Trop grand nombre de dents en travail simultanément

Effort de coupe Fc trop grand pour la résistance du noyau minimum de la broche ou/et puissance de brochage insuffisante, il faut réduire le nombre de dents en travail simultanément : utiliser une broche à denture allongée, ou, si possible, diminuer la longueur à brocher.

Diminution longueur à brocher

À effectuer aux extrémités de la forme pour assurer la continuité du brochage évitant le bourrage de copeaux dans les inter-dents : rupture de broche (fig. 3.25).

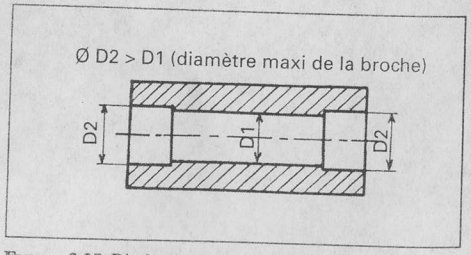


FIGURE 3.25 Diminution d'une longueur à brocher.

Petites séries

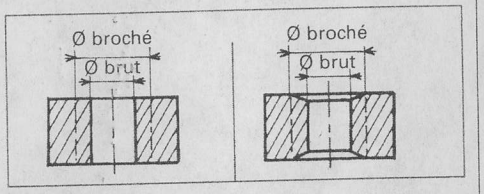
Limiter le brochage au profil difficilement usinable (la forme alésage étant obtenue préalablement en demi-finition ou finition).

Brochage d'intérieur

Les dents travaillant sur toute la périphérie de l'outil, la longueur maximale à brocher sera : au plus, égale à deux diamètres de broche ; non multiple du pas de denture (évite le risque de coupe saccadée avec état de surface irrégulier).

4.2 Réduction d'usure des dents

Pour protéger les arêtes coupantes, effectuer au préalable :
Un dressage de la face attaquée par les dents pour supprimer le contact arête de coupe/surface brute (de coulée ou formage).
Un chanfrein d'entrée qui évite également un éventuel ébavurage (de même pour chanfrein de sortie) (fig. 3.26).



a – Faces dressées (d'appui ; d'attaque).

b – Chanfreins (entrée, sortie) et face d'appui dressée.

FIGURE 3.26 Préparation de pièces à brocher en intérieur.

4.3 Autres conditions d'usinage

Évidement dans une forme

À usiner après brochage (rainure, gorge...) :

Sur une forme extérieure

Pour ne pas affaiblir localement la pièce, évitant la possible déformation d'une paroi mince sous les efforts de coupe (fig. 3.27).

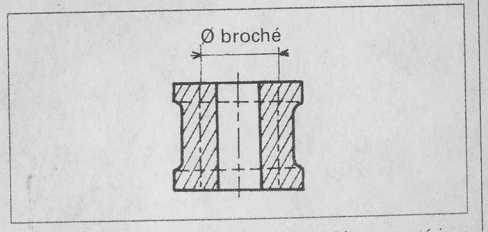


FIGURE 3.27 Usinage après brochage : évidement extérieur.

Dans une forme intérieure

La coupe de chaque dent doit être continue : évite le bourrage de copeaux dans l'évidement (risque de rupture de la broche) (fig. 3.28).

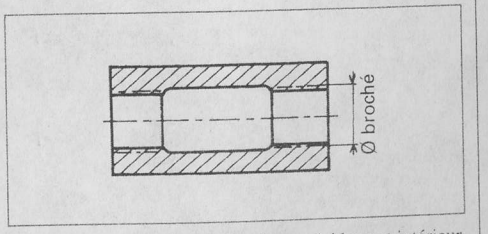


FIGURE 3.28 Usinage après brochage : évidement intérieur.

Matériaux

De dureté supérieure à 100 daN/mm^2, provoquent une usure rapide des arêtes de coupe.

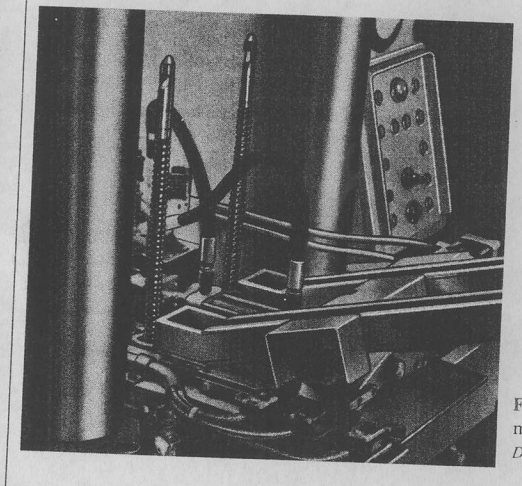
Traitement thermique d'homogénéisation

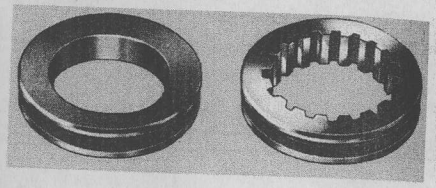
Améliore l'état de surface obtenu au brochage ; évite l'arrachement de particules sur la forme brochée.

5. Porte-pièce

5.1 Brochage d'intérieur

L'effort de coupe plaque la pièce sur son appui (fig. 3.29).
L'alimentation automatique (chargement, déchargement) est aisé (fig. 3.29).





a – Avant brochage *b – Après brochage*

FIGURE 3.29 Exemple de brochage avec alimentation automatique.
Doc. A. KLINK-GMBH

Poussée sur les dents en travail

À équilibrer par l'outillage si les dents ne travaillent pas en opposition (cas des broches plates de rainurage nécessitant un centreur de broche dans l'alésage) (fig. 3.23).

5.2 Brochage d'extérieur

Le porte-pièce doit s'opposer à la poussée des dents en travail : la ou les pièces sont à fixer efficacement sur leur support (fig. 3.3).
En production de grande série, le bridage est automatisé (assistance hydraulique de la brocheuse).

6. Machines

Les brocheuses travaillent en tirant, afin que l'outil ne flambe pas sous l'effort de coupe souvent très important (plusieurs dents en prise sur tout le profil de la forme) (fig. 3.30).
Elles sont généralement de conception verticale avec courses de 0,600 à 2,400 mètres, selon les machines.

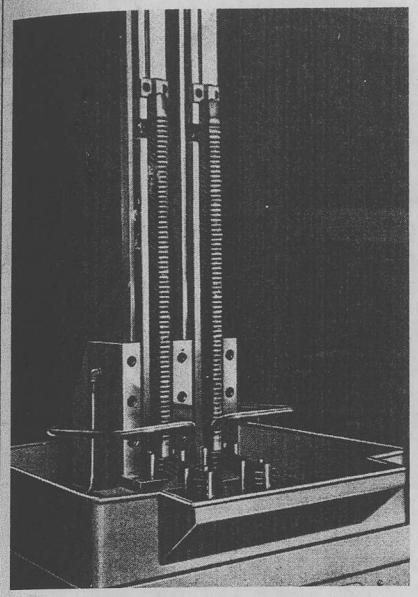


FIGURE 3.30 Brochage d'intérieur de groupe de pièces.
Doc. A. KLINK-GMBH

6.1 Mouvement de coupe

Il est obtenu par vérin(s) hydraulique(s) :
- machines de puissance 1 000 à 5 000 daN, avec un vérin ;
- machines de puissance 5 000 à 8 000 daN, généralement avec 2 vérins en parallèle (fig. 3.31).

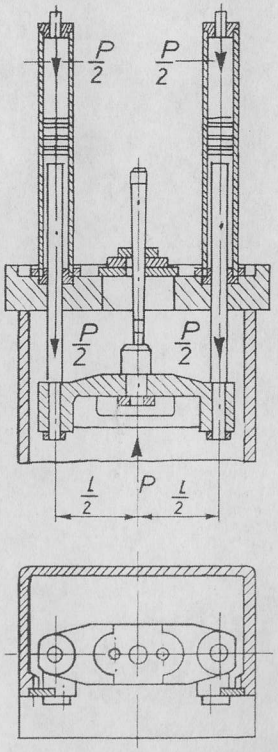


FIGURE 3.31 Schéma de brocheuse d'intérieur à deux vérins de traction.
Doc. A. KLINK-GMBH

6.2 Brochage circulaire

Broches de type cylindrique utilisées sur machines spécifiques (fig. 3.32).

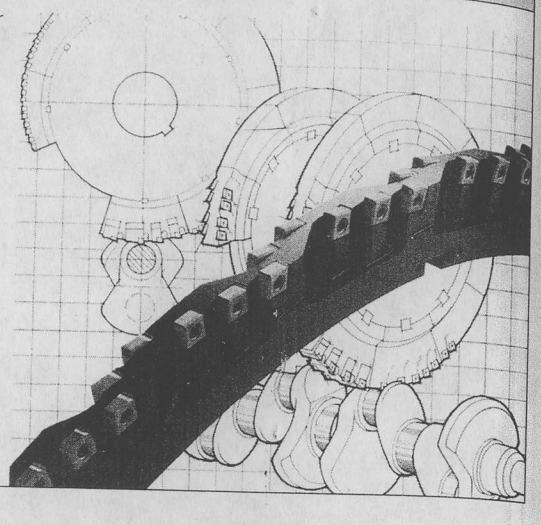


FIGURE 3.32
Élément de broche circulaire pour machine spécifique.
Doc. Sandwik-coromant

7. Utilisation

Production de grande série, les broches sont des outils spécifiques à chaque forme à obtenir, donc à amortir pour un type de pièces donné.
Usinage de grande précision (forme, dimensions, état de surface) de formes difficilement réalisables par un autre procédé d'usinage (fig. 3.33) : profils à crans, à cannelures, à dentures, quelconques, finition d'alésage.

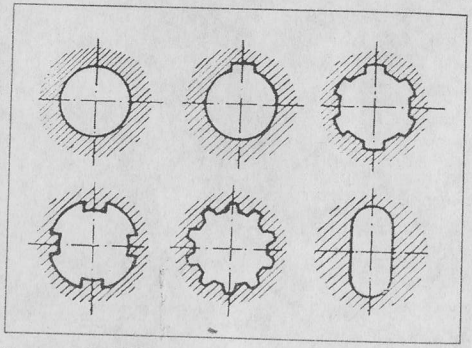


FIGURE 3.33 Différentes formes réalisables en brochage d'intérieur.
Doc. FRÖMAG

8. Rainurage

Réalisation d'une rainure, par passes successives d'un outil mono-arête en coupe rectiligne-alternative.
La génération de rainure est automatique : coupe en tirant l'outil, retour outil dégagé.
Profondeur de passe et hauteur de rainure à programmer en début de cycle.
L'outil est guidé dans un centreur qui intègre un coin de prise profondeur de passe.
Machine à broche verticale (fig. 3.34). La pièce repose sur la table, avec des bagues de centrage supérieur et inférieur : usinage pièces de petite à grande dimension et masse importante.

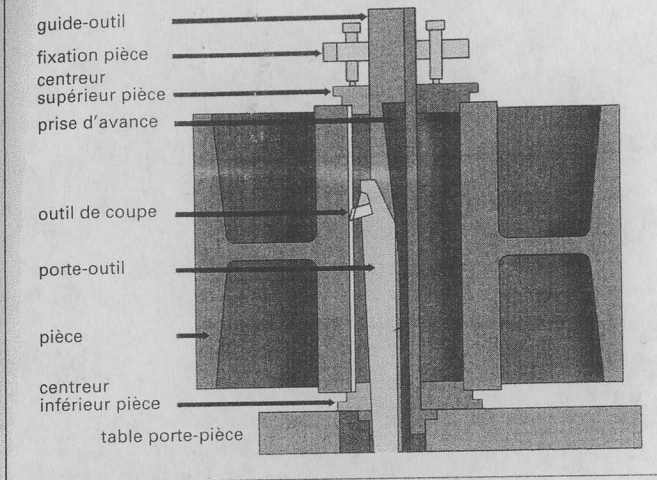


FIGURE 3.34 Schéma de rainurage (zone de travail).
Doc. FRÖMAG

8.1 Utilisation

Travaux unitaire et de série en rainurage : rainures normalisées et de profils quelconques (outils de conception simple).
Avec CN, brochage rectiligne et hélicoïdal de dentures au profil quelconque (fig. 3.35).

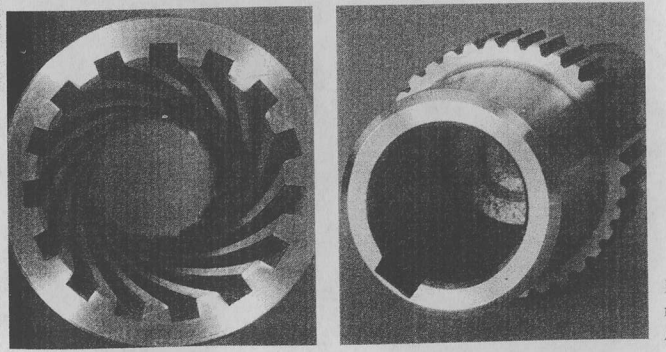


FIGURE 3.35 Pièces obtenues sur rainureuse.
Doc. FRÖMAG

4 PROCÉDÉS DE DÉCOUPE

1. Différents procédés de découpe 103
   1.1 Généralités 103
2. Découpe au laser 104
   2.1 Principe 104
   2.2 Laser de découpe au CO_2 104
   2.3 Mise en œuvre 105
   2.4 Machines de découpe laser 106
   2.5 Sécurité 106
   2.6 Utilisation 107
3. Découpe au jet d'eau 107
   3.1 Principe 109
   3.2 Eau de découpe 109
   3.3 Jets de découpe 110
   3.4 Mise en œuvre 110
   3.5 Machines 111
   3.6 Utilisation 112
4. Découpe par oxycoupage 113
   4.1 Principe 113
   4.2 Mise en œuvre 113
   4.3 Utilisation 114
   4.4 Machines de découpe 114
5. Découpe au jet plasma 115
   5.1 Principe 115
   5.2 Jets plasmagènes 116
   5.3 Mise en œuvre 116
   5.4 Machines 116
   5.5 Utilisation 116

6. Découpe par poinçonnage 118
6.1 Généralités 118
6.2 Outillages de découpe 120
6.3 Conception des outillages 127
6.4 Mise en bande des pièces 131
6.5 Machines 132
6.6 Découpage fin 134
6.7 Grignotage 135
7. Découpe par cisaillage, tronçonnage, sciage 137
7.1 Cisaillage 137
7.2 Tronçonnage à l'outil de coupe 138
7.3 Tronçonnage aux outils tournants : meule et fraise-scie 139
7.4 Sciage 139

1. Différents procédés de découpe

1.1 Généralités

Les procédés de découpe permettent de produire des pièces et/ou des formes de pièces, généralement à partir de bruts en plaque (tôles, bandes), dans des matériaux métalliques.
Certains procédés peuvent découper divers produits non métalliques (réfractaires, alimentaires, plastiques...) ; d'autres procédés sont plus spécialement adaptés au débit de bruts en barres (profilés, étirés, laminés).

Principaux procédés de découpe

- Découpe au laser (faisceau d'énergie) par action thermique.
- Découpe au jet d'eau (faisceau d'énergie) par action abrasive.
- Découpe par oxycoupage, par action thermique.
- Découpe au jet plasma, par action thermique.
- Découpe en poinçonnage et découpage, par action mécanique.
- Découpe en cisaillage, par action mécanique.
- Découpe en tronçonnage et sciage, par action mécanique (coupe).

Critères de choix d'un procédé

Le choix d'un procédé est fonction de différents paramètres, et en particulier :

Nature du matériau

Tel procédé ne peut pas découper certains matériaux, et en particulier les matériaux non métalliques.

Épaisseur à découper

Chaque procédé a naturellement ses limites de découpe.

Qualité de la découpe

Critères retenus : largeur de la saignée ; présence de dépouille, de bavures, de déformations ; état de surface ; modification localisée de la structure du matériau.

Coût de production

Il est fonction du procédé, de l'outillage et de la mise en œuvre pour une quantité à produire.

Quantité à produire

Avec le matériau, la quantité conditionne en particulier le choix du procédé : production technico-économique et productivité.

Outillage

Procédé nécessitant peu ou pas d'outillage spécifique à une découpe donnée : généralement, production unitaire à petite série. Certains procédés permettent la production de série (petite à grande) sans outillage important.

2. Découpe au laser

2.1 Principe

Faisceau laser

Un faisceau laser à haute densité d'énergie découpe thermiquement le matériau à usiner. Une source de chaleur est focalisée jusqu'à obtenir un faisceau de faible diamètre (≅ 0,1 mm dans les aciers ; ≅ 0,5 mm dans des matières fiables) (fig. 4.1). Sa focalisation s'effectue à la surface du matériau. Au point d'impact se forme un « puits capillaire » dont les parois, constituées par le matériau à découper, piègent l'énergie du faisceau.

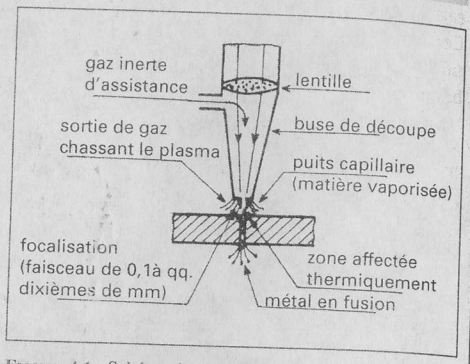


FIGURE 4.1 Schéma de découpe au faisceau laser.

Gaz d'assistance

Il expulse de la saignée les particules du matériau en fusion et protège le dispositif de focalisation (lentilles) contre les remontées de vapeur métallique et d'éventuelles projections du matériau découpé.
Le jet chasse le plasma qui se forme au-dessus de la pièce, évitant d'obscurcir l'atmosphère entre buse et surface usinée (qui arrêterait le faisceau).

Découpe des métaux ferreux

Le jet de gaz provoque une réaction exothermique entre métal fondu et oxygène produisant une amélioration de la coupe et de l'avance de découpe.

2.2 Laser de découpe au CO^2

Ce sont les plus utilisés : ils sont fiables et délivrent couramment une puissance de 2 kW et jusqu'à 15 kW avec l'hélium en gaz de coupe (fig. 4.2).

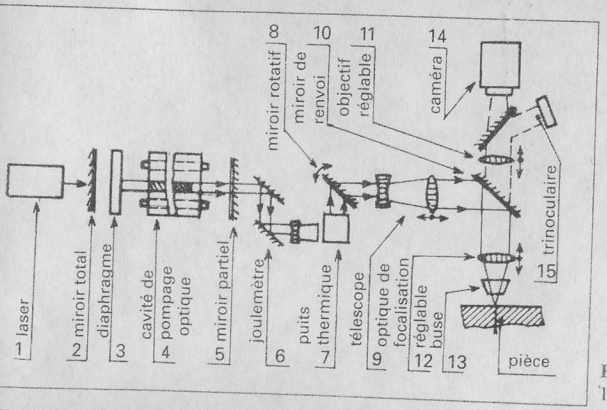


FIGURE 4.2 Schéma de principe d'un laser de découpe avec renvoi d'angle.

Laser à gaz moléculaire CO^2 continu

Le milieu émetteur est un mélange gazeux (CO^2, azote et hélium). L'énergie est fournie par une décharge électrique dans le gaz.
Cette source de laser produit des faisceaux à onde continue d'une puissance de 500 à 2 000 W.
Le faisceau vaporise les matériaux tendres (bois, papier...).

Laser YAG, au CO^2 pulsé

L'énergie est transmise par pompage optique, produisant des faisceaux pulsés d'une puissance de 400 à 2 000 W.

2.3 Mise en œuvre

Le faisceau produisant une source d'énergie et de lumière, il importe de connaître les paramètres optiques, thermiques et physiques, soit :

Paramètres optiques

Coefficient d'absorption du matériau : correspond à une longueur d'onde donnée.
Réflexivité du matériau. Pour connaître le pourcentage de puissance réfléchie sur la surface de la pièce. La réflexivité dépend de la température (elle diminue si la température augmente).
Les propriétés optiques du matériau permettent de déterminer la longueur d'onde optimale, d'où la réflexivité minimale, soit puissance réfléchie/puissance incidente.

Paramètres thermiques

Flux de chaleur, provoqué par le rayonnement laser : dépend de la conductivité thermique et de la chaleur spécifique du matériau.
Diffusivité, qui dépend de l'échauffement : elle est inversement proportionnelle à la chaleur spécifique du matériau. La diffusivité permet de déterminer la vitesse d'absorption et de « conduite d'énergie » d'un matériau.

Conditions technologiques

Indiquées dans des tableaux de données (par les constructeurs) : recherche de la découpe sans bavures, ou presque (cas des métaux, ou le métal fondu et oxydé forme une légère bavure, mais facilement détachable).

Conditions limites de découpe

Pour les définir, il faut connaître : puissance du laser, constante de position du foyer, distance buse/pièce, vitesse d'avance de découpe, gaz d'assistance et sa pression d'utilisation, refroidissement éventuel de la zone de découpe, qualité de la découpe (état de surface, bavures ou non...).

Faisceau laser

Se dirige facilement par déplacement de l'optique ou/et du porte-pièce, en particulier pour les lasers solides YAG (longueur d'onde permettant l'acheminement du faisceau par fibre optique).

2.4 Machines de découpe laser

Elles sont à CN trois axes en général, avec pièce mobile et laser fixe ou pièce immobile et laser mobile, permettant la découpe plane (fig. 4.3).

Capacité. De petite à grande dimension (table porte-pièce de 2 × 4 m).

La vitesse de découpe dépend de la rigidité dynamique (inertie au changement de direction).

Investissement important. Nécessité d'un environnement « propre » (local spécifique).

Distance buse/surface de pièce. Elle doit être constante (capteur capacitif de contrôle pour surfaces non planes) pour une découpe de qualité régulière.

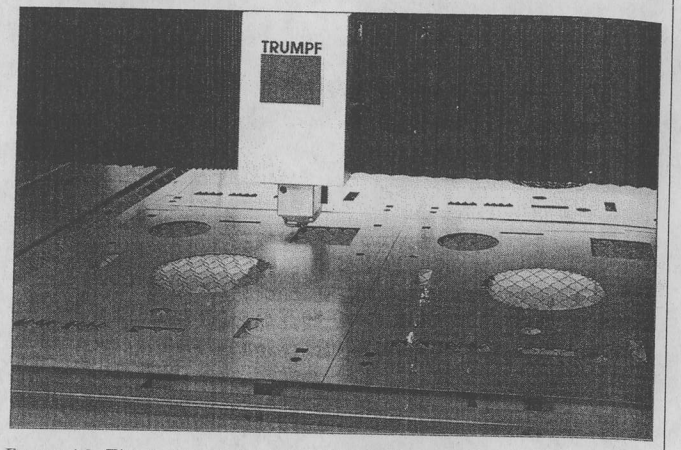


FIGURE 4.3 Tête de découpe laser avec pièces usinées. *Doc. Trumpf*

Axe rotatif C. Permet les découpes circulaires, sur des formes cylindriques (tubes), suivant diverses positions angulaires (profils divers).

Découpe 3D. Avec machine 5 axes, le faisceau laser devant resté normal à la surface découpée.

Commande numérique. Elle peut avoir des fonctions d'assistance : lissage de courbes (3D), calcul de paramètres, autodiagnostic...

2.5 Sécurité

Protection visuelle, anti-laser pour l'opérateur (cartérisation ou/et lunettes).
Dévermination. Environ après 100 heures de fonctionnement (≅ 2 millions de tirs).
Régularité du débit et de la température de l'eau (désamorçage des tubes).
Inhibition de la commande de tir lorsque le seuil maxi de l'énergie de pompage est atteint (laser YAG).
Arrêt de la machine en cas de dépassement de la puissance maxi.

Incidents

Un mauvais réglage des miroirs provoque un désalignement du faisceau.
Une non-protection de la lentille contre les projections de métal en fusion peut provoquer son claquage.
Une oxydation des lampes éclairs de laser YAG provoque un éclairement non uniforme du barreau.

2.6 Utilisation

Matériaux

Permet la découpe à grande vitesse de la plupart des matériaux, comme les aciers trempés ou non, le titane, les inoxydables, le bois, le papier, le carton, le verre, les plastiques, les composites (fig. 4.4).
Le laser ne convient pas aux matériaux réfléchissants (cuivre, aluminium...) ou sensibles à la chaleur (tissus...). La découpe de diverses matières plastiques est nocive : émissions de fumées nocives provoquées par la chaleur.

Puissance laser	Matériaux usinés
< 1 000 W	**Matériaux métalliques** • Acier en tôles minces (allié ou non, galvanisé, inoxydable...) • Métaux frittés **Matériaux non métalliques** • Composite, plastique, bois, fibres synthétiques, cuir, tissus, carton, papier...
1 000 à 2 000 W	**Matériaux métalliques** • Acier en tôles épaisses (20 mm) : pièces de tous types **Matériaux plastiques, composites**
> 2 000 W	**Matériaux métalliques** • Acier blindé, traité, pièces tubulaires...

FIGURE 4.4 Principaux matériaux découpés par laser.

Précisions

Saignée de découpe. Elle est étroite (quelques dixièmes de mm) avec une déformation minime, d'origine thermique.
Précision dimensionnelle des découpes. Elle est du dixième de mm, avec des bords découpés sans bavures et un état de surface de meilleure qualité qu'avec les autres procédés (fig. 4.5).

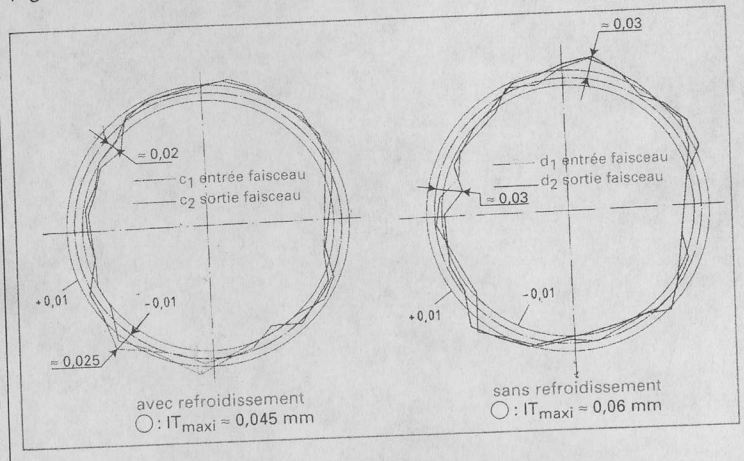


FIGURE 4.5 Précision macro-géométrique en découpe laser.
Alésage Ø 30, épaisseur 1,5 mm dans acier rapide.
Doc. Carl Hanser Verlag, Munich d'après revue « Production de précision suisse ».

Conditions de découpe

Vitesse de découpe

Elle est de 40 m/min maxi et dépend : du matériau et de son épaisseur ; des possibilités technologiques (type de laser, performances de la machine, trajectoires à suivre).

Nota : Les caractéristiques mécaniques des matières à découper n'ont pas d'effet limitatif sur la vitesse.

Effort de découpe. Nul, donc pas de déformation de pièce (la fixation n'a pas à être efficace).
Brûlure aux bords de saignée. Elle est évitée par la découpe à grande vitesse (CN à traitement rapide des informations).

Épaisseur maximale découpée

Elle est liée aux paramètres physiques (focalisation du faisceau, absorption d'énergie) et techniques (puissance du laser) (fig. 4.6).
Les aciers (non alliés, inoxydables...) sont découpés jusqu'à 25 mm d'épaisseur, avec une puissance de 15 000 W et une vitesse d'avance d'environ 1 m/mm.
Les bois, les plastiques et les composites sont découpés jusqu'à environ 30 mm d'épaisseur.

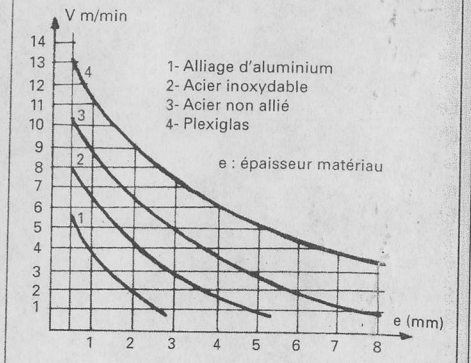


FIGURE 4.6 Ordre de grandeur de vitesse de découpe au laser 1 000 W.

3. Découpe au jet d'eau

3.1 Principe

Une buse de focalisation forme un jet d'eau haute pression ou un jet cohérent de mélange eau haute pression et particules abrasives, coupant le matériau par effet de cisaillement (fig. 4.7).
La haute pression du jet fluide transforme l'énergie potentielle en énergie cinétique (850 m/s sous 4 000 bar).
L'introduction de l'abrasif se fait en dépression (par effet Venturi).
La matière est désagrégée et repoussée dans la saignée.
Une faible conicité d'entaille est créée avec étranglement du côté de la sortie du jet, et en particulier avec jet eau-abrasif.

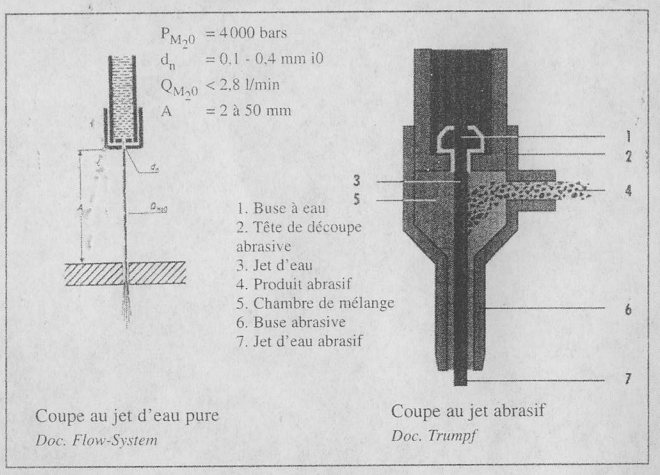


FIGURE 4.7 Schéma de buses de focalisation du jet d'eau.

3.2 Eau de découpe

L'eau est filtrée, traitée et sortie à une pression de 2 800 à 4 000 bars, puis injectée dans la buse (de quelques dixièmes de mm en diamètre) atteignant une vitesse de pénétration perforant le matériau situé à quelques millimètres de la buse.

Vitesse de pénétration du jet (la coupe)

D'environ 1 000 m/s à la sortie de la buse d'injection, elle diminue ensuite. Après une zone de coupe par usure, l'énergie cinétique résiduelle agit par effet d'abrasif, avec risque de formation de stries dans la coupe (fig. 4.8).

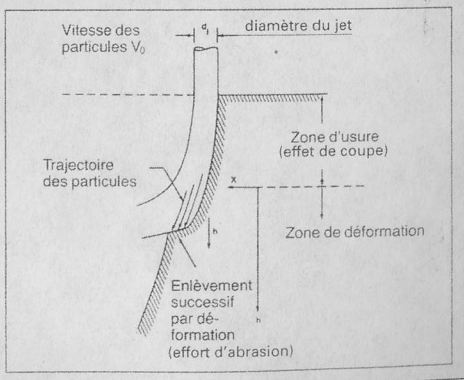


FIGURE 4.8
Phénomène de la découpe par jet d'eau.
Doc. Flow-System

Vitesse de découpe (avance)

De 30 m/min au maximum, dans des matériaux de faibles épaisseurs (les tissus). Elle influe sur la qualité de coupe : meilleur état de surface et très faible conicité d'entaille à vitesse d'avance réduite.

3.3 Jets de découpe

Débit

Il varie en fonction du matériau et sera sensiblement constant jusqu'à une épaisseur à découper de 30 mm.

Jet d'eau pure

C'est un outil propre, stérile, ne produisant ni chaleur, ni effort, ni poussière, ni vapeur, ni fumée, et la saignée est fine.

Nota : Les matières découpées sont mouillées.

Jet d'eau abrasif

Les abrasifs mélangés à l'eau sont généralement le grenat et l'olivine.
Inconvénients. Il y a production de poussière et de bruit, avec conicité de l'entaille.
Liquide résiduel. Très agressif, nécessitant impérieusement un traitement d'épuration (décantation) avant rejet à l'égout.

3.4 Mise en œuvre

Conditions technologiques

En fonction du matériau et de son épaisseur, elles sont à définir d'après des bases de données des constructeurs pour : vitesse d'avance (découpe), pression d'utilisation, type et débit de l'abrasif.

Pression d'utilisation.

Elle est normalement de 2 000 à 3 000 bars, sous un débit de 4 à 5 litres/min d'eau et 0,7 kg/min d'abrasif (fig. 4.9).

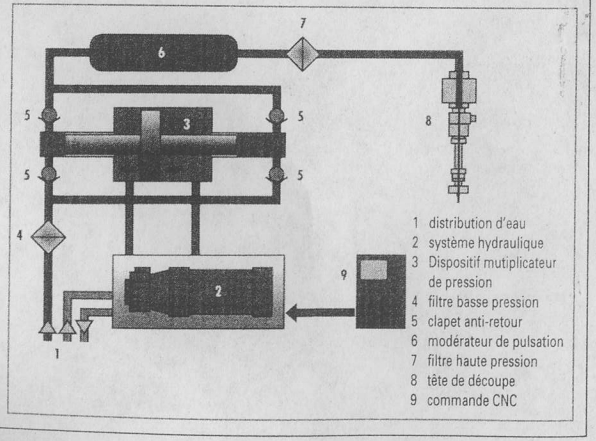


FIGURE 4.9
Schéma de principe de la génération haute pression en découpe jet d'eau.
Doc. Trumph

Buse d'injection

Son diamètre varie de 1 à 2,5 mm, en fonction de sa distance à la pièce (10 mm maximum). Il diminue avec l'accroissement de la distance buse/pièce.

Pièce(s) à découper

Sa fixation sera « légère » (aucun effort de découpe) évitant une déformation de pièce(s).

La découpe

Elle peut s'effectuer sur pièce (très) chaude, froide, cassante, sous l'eau.

3.5 Machines

La commande numérique permet la flexibilité de production (bibliothèque de formes, vitesse de traitement, logiciel 3D, contournage quelconque...).

Machine à portique

À CN de 2 ou 3 axes, avec table porte-pièce de grande capacité (plusieurs m^2) pouvant supporter des charges importantes (1 000 daN/m^2, et plus) (fig. 4.10).
La buse est orientable sur certaines machines (découpe oblique) (fig. 4.11).

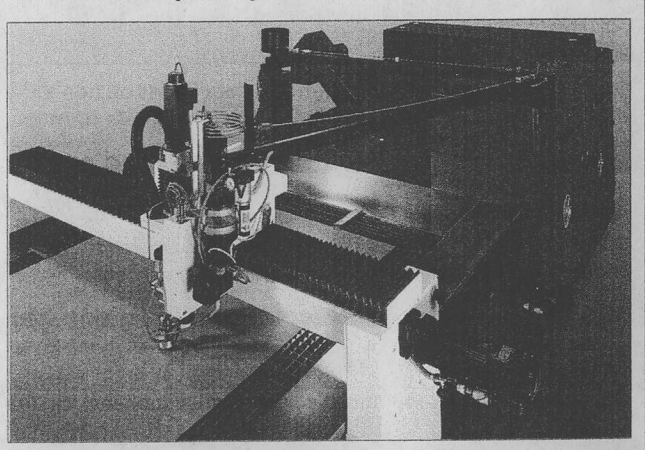


FIGURE 4.10
Machine de découpe jet d'eau.
Doc. Trumph

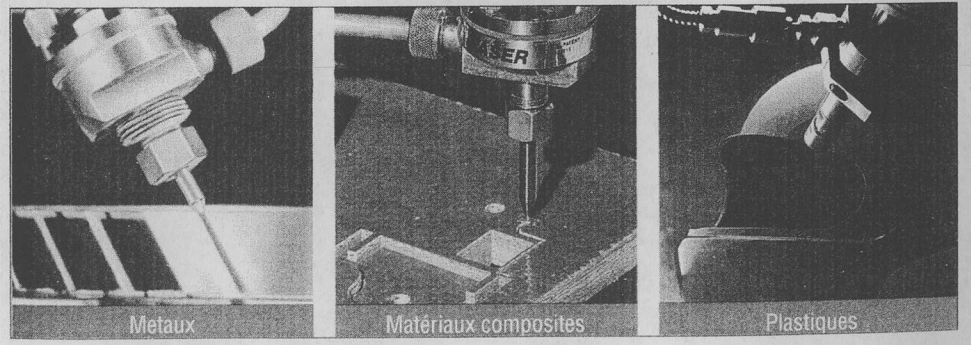


FIGURE 4.11 Exemple de découpe au jet d'eau.
Doc. Flow-France

Cellule de découpe

Avec robot multi-axes (4 à 5) sur portique et CN 3D avec orientation du poignet porte-buse.

Optimisation

Chargement machine

Table de préparation, table immergée dans l'eau, convoyeur avec accès des deux côtés de la table (axe X).

Multipostes de découpe

Alimentés à partir d'une unité d'intensification de pression.

Sécurités d'utilisation

Elles sont impératives, tout particulièrement avec jet abrasif : non-accès à la zone de coupe, antibruit pour l'opérateur et l'environnement, récupération des poussières de découpe ; filtrage de l'eau usée avant rejet.

3.6 Utilisation

Découpe de la plupart des matériaux métalliques ou non, réfléchissants, sensibles à la chaleur, matières diverses, avec une précision en largeur de découpe de 0,10 mm en moyenne.

Découpe au jet d'eau pure

Produits minces.

Découpe particulièrement des matières minces et non métalliques : papier, carton, plastiques, caoutchouc, laine de verre, textiles, produits alimentaires...

Découpe au jet d'eau abrasif

Matériaux durs

Découpe particulièrement des aciers (toutes nuances), du titane, des céramiques...

Produits épais

Découpe de plusieurs centaines de mm (et plus) par superposition de pièces homogènes ou hétérogènes (acier et caoutchouc...) (fig. 4.11).

4. Découpe par oxycoupage

4.1 Principe

La fusion localisée du matériau métallique sous l'action de la combustion d'un gaz comburant (acétylène, propane, gaz de ville, hydrogène) avec apport d'oxygène pur, produit une température de 1 300 °C (fig. 4.12).

La découpe est obtenue par réaction d'oxydation exothermique, avec températures d'amorçage et de fusion de l'oxyde formé au plus égales à celle de fusion du métal. Le jet d'oxygène fusionne le métal et évacue les oxydes formées permettant le contact permanent oxygène/métal (les oxydes sont à l'état liquide et s'évacuent sans difficulté, chassées par le jet de coupe) (fig. 4.13).

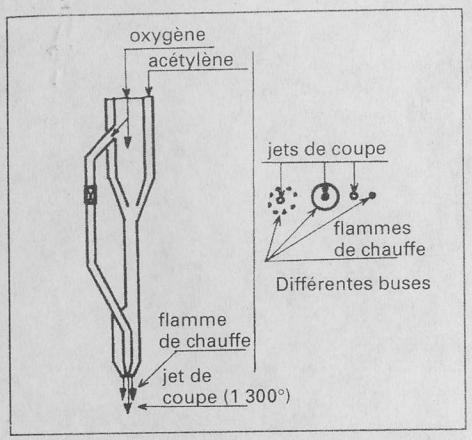


FIGURE 4.12 Schéma de chalumeau d'oxycoupage.

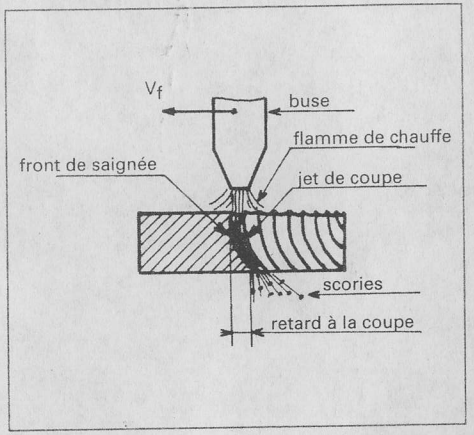


FIGURE 4.13 Schéma jet de découpe par oxycoupage.

4.2 Mise en œuvre

Faible coût de production (machine de conception simple).

Caractéristiques de la découpe

- Largeur de saignée de 0,3 à 2 mm, selon les épaisseurs de tôle.
- Bords de saignée : irréguliers, thermiquement affectés (fusion et arrachement de métal).

Maintien de la plaque

Sans bridage (pas d'efforts latéraux). Le poids de plaque est suffisant pour son maintien sur table.

Sécurité d'utilisation

- Cartérisation de la zone de découpe (projections de particules métalliques chaudes).
- Port de lunettes. Pour visualiser la découpe en toute sécurité.

Trajectoires du (ou des) chalumeau(x).

Obtenues par commande numérique à vitesse de 100 à 600 mm/min, ou par système de lecture otique (moins précis).

4.3 Utilisation

Découpe de tôles épaisses (jusqu'à 500 mm d'épaisseur) suivant des profils quelconques; découpe de plusieurs pièces en simultané sur machine à plusieurs chalumeaux.

Aciers

Découpe des aciers à faible teneur en carbone: réaction d'oxydation exothermique, températures d'amorçage et de fusion non supérieures à celle de fusion du métal.

Matériaux dont les oxydes formés sont réfractaires (non fondus)

Fontes et aciers inoxydables

Découpe avec un jet de sable associé au chalumeau: évacuation des oxydes.

Cuivre, laiton, nickel, alliages d'aluminium

Découpe avec un jet de poudre de fer associé au chalumeau: apport calorifique par combustion de la poudre de fer provoquant des combinaisons fusibles et l'évacuation des oxydes (fig. 4.14).

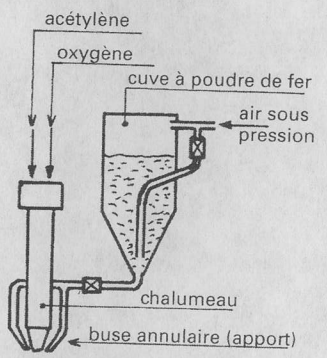
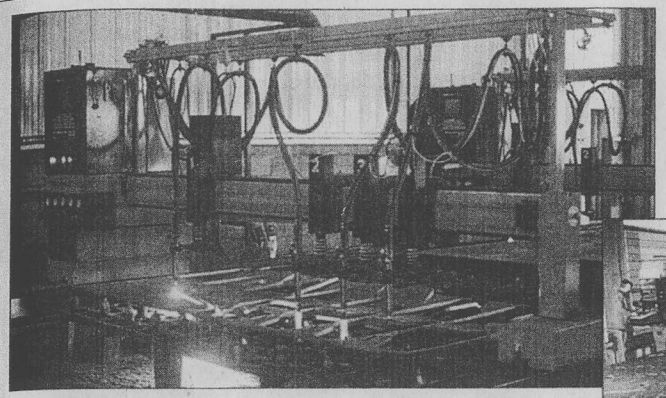


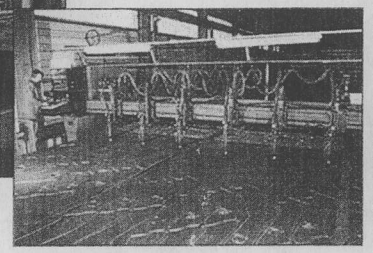
FIGURE 4.14 Schéma de découpe avec apport calorifique.

4.4 Machines de découpe

À CN, avec plusieurs chalumeaux de découpe (fig. 4.15). La programmation spécifique facilite le dialogue opérateur/machine. Optimisation avec bibliothèque de programmes, de formes types, logiciel d'imbrication permettant la production maximale avec le minimum de chutes. Les machines à lecture optique du déplacement sont généralement équipées d'un seul chalumeau de découpe.



Doc. revue « Métiers » de NUM 5a
Photo Oxymill



Doc. Air liquide

FIGURE 4.15 Machines d'oxycoupage multi-chalumeaux à CN.

5. Découpe au jet plasma

5.1 Principe

Un arc électrique est créé entre une électrode en tungstène et la plaque à découper, provoquant la ionisation intense d'un gaz ou d'un mélange de gaz. Des décharges électriques sont provoquées dans le gaz soumis à l'action d'un champ à haute fréquence, à l'intérieur d'un chalumeau générateur d'un arc électrique continu. La différence de potentiel engendre un jet de plasma très concentré qui fusionne la matière et l'expulse hors de la saignée (énergies thermique et cinétique) (fig. 4.16). La concentration de l'air permet d'obtenir de très hautes températures (30 000 °C) qui provoquent la fusion du métal.

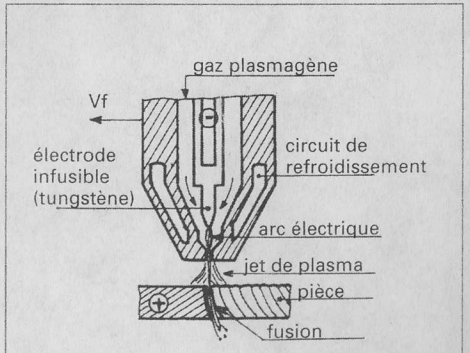


FIGURE 4.16 Schéma de torche à projection gazeuse de découpe au jet plasma.

5.2 Jets plasmagènes

Principaux gaz plasmagènes utilisés : air comprimé, azote, mélange argon-oxygène, hydrogène. On utilise également l'eau.

5.3 Mise en œuvre

La localisation d'énergie dans la torche assure une découpe aux bords assez réguliers, surtout pour les faibles épaisseurs.

Plasma à haute définition

En confinant au maximum le jet plasma dans la buse, la qualité des bords découpés équivaut à la découpe au laser.

Sécurité d'utilisation

Il est nécessaire de se protéger des nuisances (pollution de l'air, bruit, rayonnement).

5.4 Machines

À CN : gestion vitesses et accélérations en fonction des trajectoires, avec « ajustement » en continu de la distance buse/surface de la plaque et débit de gaz.
Optimisation par bibliothèque de formes et fonctions d'imbrications.

5.5 Utilisation

Découpe des métaux conducteurs d'électricité, ferreux ou non, d'épaisseurs jusqu'à 50 mm. Vitesses de découpe de 1 à 6 m/min, selon les épaisseurs, pour un coût de production relativement peu élevé (fig. 4.17).

Doc. revue « Métiers » de NUM Sa – Photo SAF

Doc. Air liquide

FIGURE 4.17
Opération de découpe au jet plasma.

Torche à projection gazeuse.

Découpe des métaux réfractaires, aciers inoxydables, aluminium (fig. 4.18).

Torche à injection d'eau.

Découpe pratiquement sans bavures et non déviée des aciers au carbone, en avance rapide (6 m/min). L'affectation de la zone thermique et les déformations (sur faibles épaisseurs) sont peu importantes (fig. 4.19).

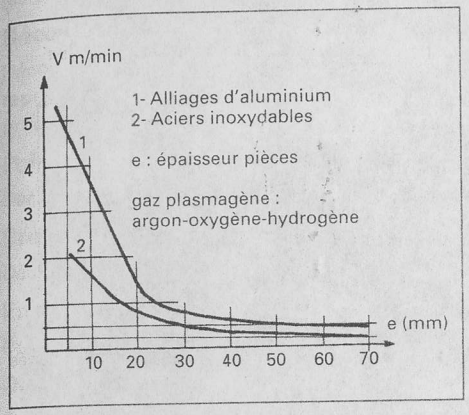


FIGURE 4.18 Vitesses de découpe au jet plasma avec torche à projection gazeuse.

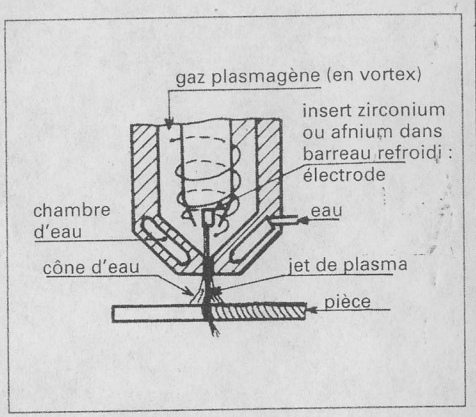


FIGURE 4.19 Schéma de torche à écoulement vortex (d'eau) de découpe au jet plasma.

6. Découpe par poinçonnage

6.1 Généralités

Découpe, par action mécanique de cisaillage sous une « frappe » (course d'outil rectiligne alternative) d'une forme intérieure ou extérieure à l'aide d'un outil de forme, le poinçon, dans un matériau en feuille (fig. 4.20).

Nécessite un outillage spécifique à la forme ou aux formes à produire dans une frappe.

Outillage de découpe. Se compose d'une matrice et d'un poinçon ajustés, dont la section droite reproduit la forme à obtenir.

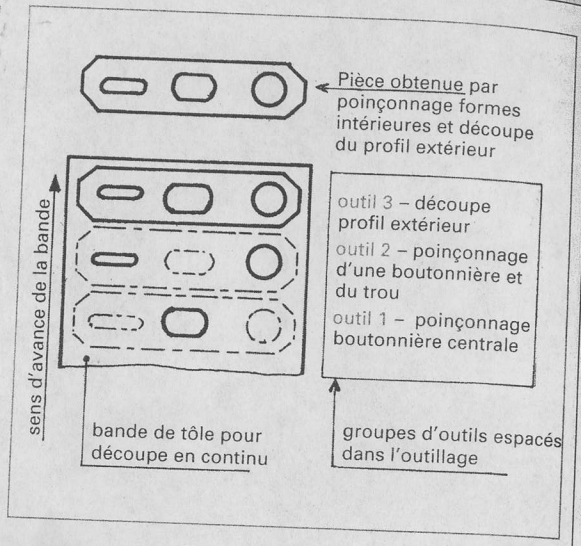


FIGURE 4.20
Schéma de découpe par poinçonnage d'une pièce en production de série.

Utilisations

n tôlerie fine, découpe jusqu'à une épaisseur maximale de 6 mm.

Grande série

vec des outillages spécifiques selon la production. Outillages très productifs, mais onéreux.

etites séries

vec des outillages élémentaires, en découpe sur profilés pour métallerie (fig. 4.21).

haudronnerie

vec des machines puissantes pour écouper des épaisseurs supérieures à la lerie fine.

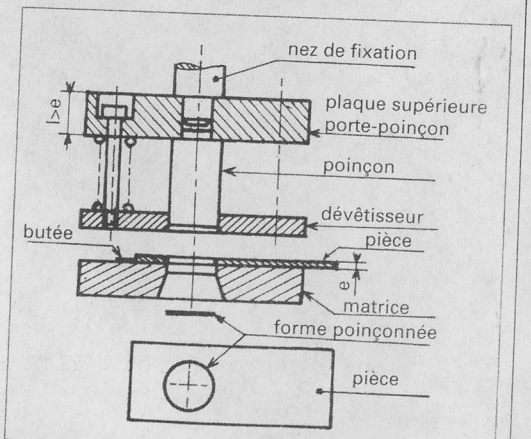


FIGURE 4.21
Schéma d'outillage élémentaire de découpe.

Mise en œuvre – Travaux de grande série

Produit brut. Tôle, en bande de largeur constante, qui assure son guidage sous l'outillage de longueur de 1 à 2 mètres, ou en bobine pour la découpe en continu. Il peut être préalablement découpé, à profiler, en reprise de finition par arasage ou détourage.

Différentes opérations de découpe

les différentes opérations de découpe sont : (fig. 4.22)

Découpage

Découpe d'un flan (brut de pièce à usiner en reprise, par emboutissage ou pliage). La découpe produit un ajour dans la bande.

Poinçonnage

Découpe de débouchures (trous de petit diamètre).

Crevage

Découpe de formes petites et non circulaires.

Encochage

Découpe de formes débouchantes.

Détourage

Découpe, en reprise de finition de profil, d'un contour préalablement découpé et déformé.

Grignotage

Découpe par poinçonnages successifs suivant un profil.

Arasage

Découpe, en reprise de finition dimensionnelle et d'état de surface, d'un contour préalablement découpé.

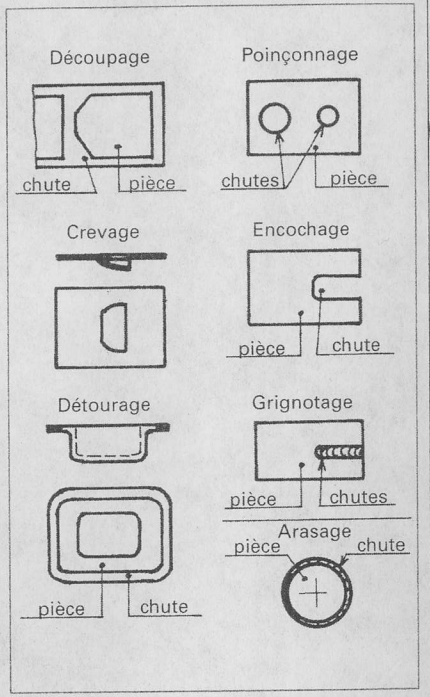
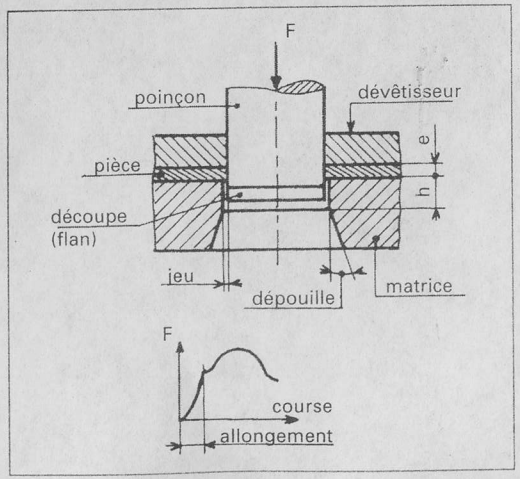


FIGURE 4.22 Différentes opérations de découpe.



Principe

Le matériau est cisaillé, sous l'effort exercé par le poinçon sur la tôle à découper. Il est soumis à une déformation élastique, puis il s'effectue un glissement avec décohésion et rupture (fig. 4.23 et 4.24).

FIGURE 4.23
Action de l'outil de découpe.

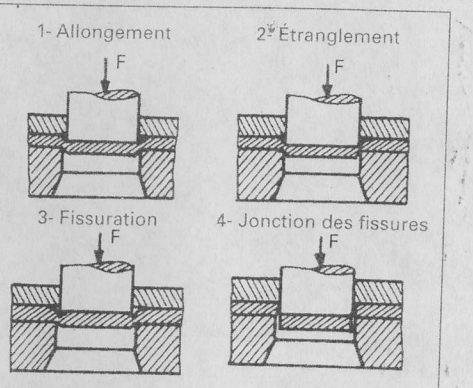


FIGURE 4.24
Principe de la découpe.

Jeu fonctionnel.

Diminue l'écrouissage du matériau qui se produit au droit du profil cisaillé.
S'oppose à une amorce de fissuration du matériau suivant le sens des fibres.
On admet. Aciers doux et laiton : $e/20$; aciers demi-durs : $e/15$; alliages d'aluminium : $e/10$; avec e = épaisseur à découper.
Une contrainte latérale F2 provoque une légère modification dimensionnelle de la forme découpée.

Élasticité du matériau.

La découpe terminée, l'élasticité du matériau a tendance à provoquer le frottement de la bande sur le poinçon, coinçant la débouchure ou le flan dans la matrice, ce qui nécessite dévêtisseur et dépouille.

Dévêtisseur

Entoure le poinçon, plaquant la bande sur la matrice au retrait du poinçon.

Dépouille

Après une hauteur limitée h = 4 à 5 mm en section constante de la forme à découper (pour rectification occasionnelle de la face de coupe) : évasement de la forme dans la matrice, assurant l'évacuation naturelle de la débouchure ou du flan.

6.2 Outillages de découpe

Généralités

Les différents outillages sont conçus pour assurer :
- La découpe des pièces avec mise en position du brut (guidage de la bande de tôle ou du flan).
- L'évacuation des déchets et le dégagement du poinçon de la bande.
- Le remplacement ou la réfection des pièces d'usure.

On peut distinguer : outil découvert ; outils couverts (à contre-plaque dit « parisien » à engrenage et à couteau ; outil à suivre ; outil à presse-bande ; outil à pilotage ; outil suisse ; outil de reprise, de détourage, de découpe à la retourne, de crevage, d'encochage, de découpe en longueur.

Outil découvert

Outillage élémentaire de découpe constitué par : un poinçon et sa matrice, sans guidage relatif, ce qui nécessite une mise en position poinçon/matrice précise ; un dévêtisseur ; un presse-bande en découpe de tôle < 1 mm (opposition à la déformation) (fig. 4.25).
Utilisation. Découpe en pleine tôle de formes simples, en travaux non sériels.
Nota : Les presses à CN assurent le maintien en position poinçon/matrice avec précision.

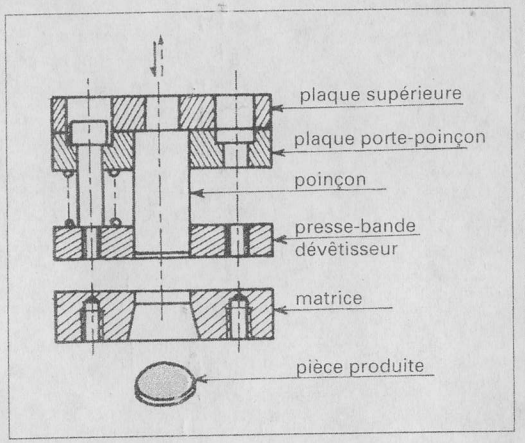


FIGURE 4.25 Schéma d'outil découvert.

Outil couvert à contre-plaque ou « parisien », à engrenage

Outillage de découpe constitué par : un poinçon et sa matrice avec leurs plaques de fixation ; un guide-bande ; une contre-plaque guidant le poinçon et provoquant le décrochement de la bande du poinçon ; une butée appelée « engrenage » assurant l'engrènement pas à pas (après chaque frappe) (fig. 4.26).
Utilisation. Découpe, en petites séries, de formes simples (cylindrique, carrée...) sans ajours, dans la bande d'épaisseur minimale ≃ 1 mm (risque de déformation de la pièce en dessous du mm).
Nota : Le poinçon reste continuellement guidé par la contre-plaque qui est solidaire de la matrice (sécurité de fonctionnement).
Pièces comportant un ajour simple (trous) : poinçonnage possible avec la découpe, comme un outil à suivre.

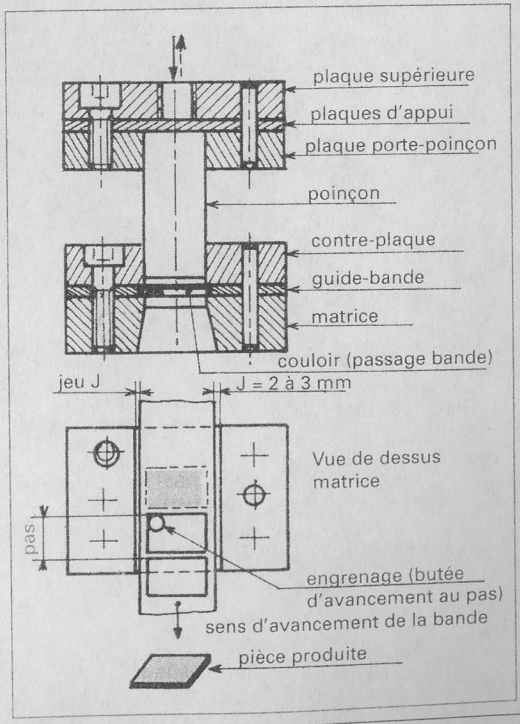


FIGURE 4.26
Schéma d'outil couvert à contre-plaque et engrenage.

Outil à suivre

Outillage comportant plusieurs poinçons avec matrices correspondantes, installés par groupes successifs.
Production d'une pièce finie (découpe et ajourage) à chaque frappe (fig. 4.27).
Pas d'avancement : assuré par une butée (type outil à engrenage ou outil à couteau).
Ensemble des poinçons d'ajourage : à diviser en plusieurs groupes, en fonction de leur nombre et de la proximité des ajours (fragilité de la matrice).
Poinçonnage des ajours : avant la découpe du profil fini.
Précision de positionnement, en reprise d'un trou ébauché par un poinçon précédent : associer un pilote au poinçon d'ajourage final du trou.
Utilisation. En production de série, pour des pièces comportant des formes intérieures (ajours) obtenues avec la découpe.

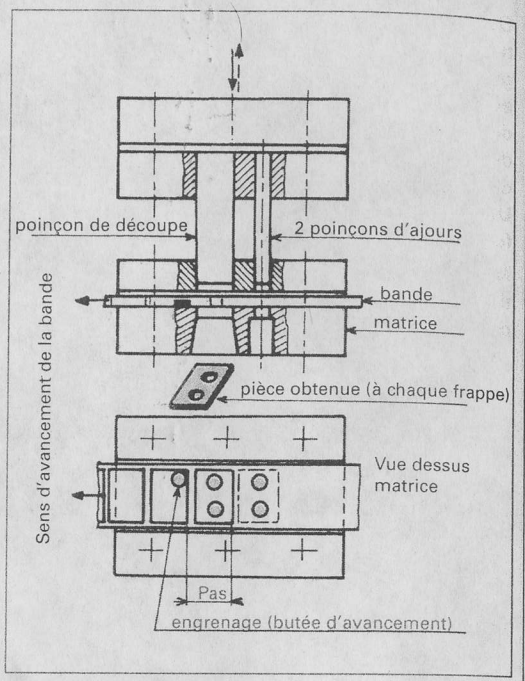


FIGURE 4.27 Schéma d'outil à suivre.

Outil couvert à suivre, dit à couteau

Outillage à suivre, où la butée – le couteau – est un poinçon rectangulaire d'avancement découpant sur un côté de la bande une longueur exactement égale au pas et de faible largeur (environ 3 mm) (fig. 4.28).
La bande. De largeur augmentée de celle de l'encoche (du pas d'avancement en butée sur ce poinçon, après chaque frappe).
Le couteau. Assure la précision de l'avancement de la bande (au pas) permettant le fonctionnement de la presse en continu. Provoque un effet de chasse, limitant l'épaisseur des bandes (environ 2 mm maxi).

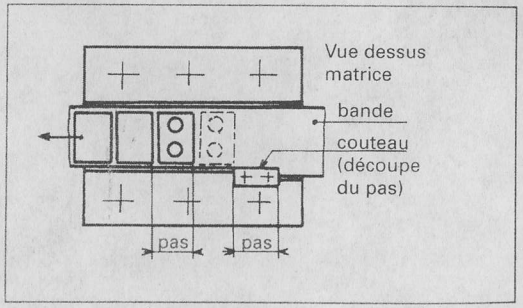


FIGURE 4.28 Schéma de guidage d'un outil à couteau.

Découpe de bandes relativement larges ou outillage à plusieurs groupes de poinçons. Placer deux couteaux en les décalant : du même côté de la bande ; de chaque côté en découpe de la tôle en rouleau (fig. 4.29).
Couteaux à béquet ou à décrochement (le plus résistant). Suppriment toutes bavures de découpe (fig. 4.30).

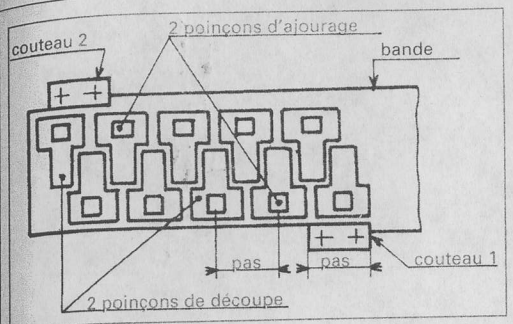


FIGURE 4.29 Couteaux guide-bande (large) en production simultanée de pièces.

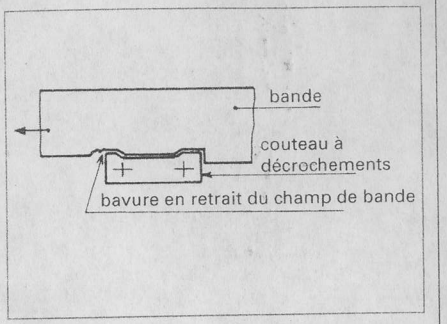


FIGURE 4.30 Couteau à décrochement.

Coût de l'outillage supérieur à l'outillage à engrenage, et perte de tôle un peu plus élevée (largeur de bande).
Utilisation. Découpe en série de pièces comportant des ajours produisant à chaque frappe une pièce (qui aurait été obtenue en plusieurs séquences : ajourages successifs ou non, puis découpe).

Outil à presse-bande

Outillage de découpe à suivre dont la contre-plaque (fixe) est remplacée par un presse-bande mobile guidé par le ou les poinçons. Des ressorts plaquent les poinçons sur la bande, évitant sa déformation durant la découpe (fig. 4.31).
Le guidage du poinçon dans sa matrice est assuré par des colonnes de guidage (2 ou 4, selon les dimensions de l'outillage).
Coût de l'outillage. Supérieur aux outillages à couteau.
Utilisation. Découpe de tôles minces (quelques dixièmes de mm) la bande étant maintenue sur la matrice durant la frappe.

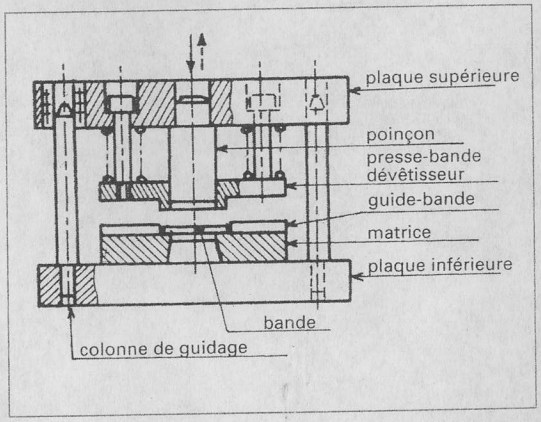


FIGURE 4.31 Schéma d'outil à presse-bande.

Outil à pilotage

Outillage à presse-bande dont l'avancement au pas et la précision de positionnement de la bande sont assurés par des centreurs (les pilotes) dans des trous poinçonnés en première séquence.
Les poinçons des trous de pilotes sont situés en tête des outils, à distance d'un pas de la découpe finale (fig. 4.32).
Le processus de fabrication est mécanisé par l'amenage automatique de la bande (ou du rouleau).
Utilisation. Découpe de tôles minces (quelques dixièmes de mm) en série, avec un minimum de perte de tôle (précision de positionnement de la bande).

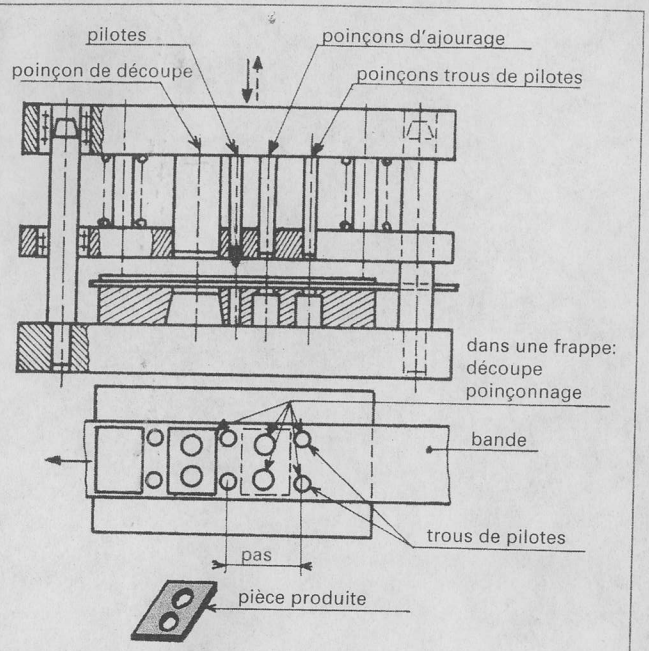


FIGURE 4.32
Schéma d'outil à pilotage.

Outil suisse ou outil bloc

Outil combiné de découpe (poinçonnage et ajourage) à presse-bande où poinçon et matrice sont inversés.
Le poinçonnage des ajours et la découpe du profil sont effectués en une seule frappe.
La précision de position des différentes formes est excellente, en fonction de la précision de l'outillage (quelques centièmes de mm) (fig. 4.33).
La précision de répétabilité est assurée (production de série).
Matrice de découpe (détourage). Elle contient les poinçons d'ajourage.
Poinçon de détourage. Il contient les matrices d'ajourage.
Pièce produite. Elle est extraite de la matrice par un éjecteur (plaque au profil découpé, actionnée par ressorts ou tiges).
Automatisation. Par amenage automatique de la bande (avec des rouleaux, sans précision).
Les débouchures de poinçonnage des ajours sont évacuées par des ponts inférieurs à la semelle (gravité).
Utilisation. Découpe de tôles minces (quelques dixièmes de mm), du fait de la concentration des outils de découpe dans l'outillage et de leur complexité éventuelle de forme.
Formes de tôles (bruts). Sans précision ; la mise en position du brut est sans influence sur la qualité de production des pièces.
Coût de fabrication. Très élevé ; concevoir cet outillage pour la série illimitée.

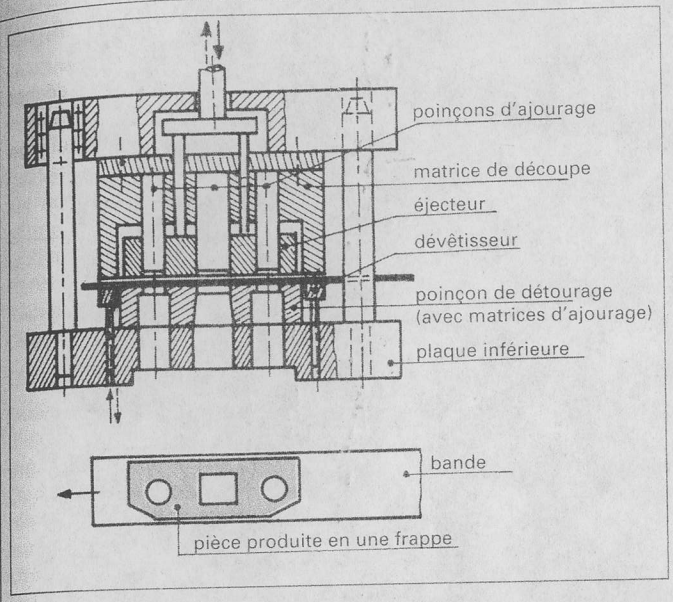


FIGURE 4.33
Schéma d'outil suisse ou outil bloc.

Outil de reprise

Outillage essentiellement de poinçonnage de flans préalablement découpés et à placer nécessairement dans un drageoir avant découpe.
Drageoir. Gabarit de mise en position précise du flan sur la matrice. Amovible pour préchargement (hors machine) de pièces de petites dimensions.
Détrompeur. Éventuellement, situant la pièce sans incertitude.
Utilisation. Poinçonnage d'ajours en production de petites séries, le coût d'outillage devant être faible.
Les flans d'épaisseur supérieure au mm sont repris dans un outillage du type à contre-plaque (fig. 4.34).
Les flans d'épaisseur inférieure au mm sont repris dans un outillage du type à presse-bande (avec serre-flan).

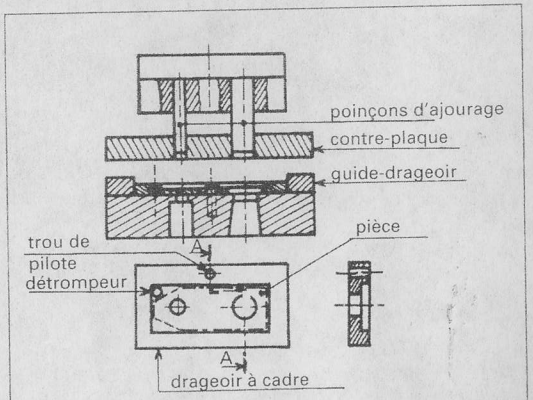


FIGURE 4.34 Schéma d'outil de reprise (type à contre-plaque).

Outil de détourage

Outillage du type découvert inversé (poinçon sur la partie inférieure).
Mise en position précise de la pièce. Reprise par centreur dans la forme emboutie préalablement.
Décrochage de la pièce du centreur. Par un éjecteur s'appuyant au droit de la découpe (évitant une déformation de la pièce).

Évacuation du déchet

Pièces inférieures au m²: Le dévêtisseur remonte le déchet permettant son évacuation.

Petites pièces: Le dévêtisseur est remplacé par des coupe-déchets qui sectionnent le déchet en plusieurs morceaux (fig. 4.35).

Grandes pièces. Nécessité de cisailler le déchet en morceaux pour son évacuation. Outillage conçu en secteurs (lames) avec vagues, favorisant l'évacuation (fig. 4.36).

Nota: Association éventuelle de poinçons d'ajourage dans l'outillage.

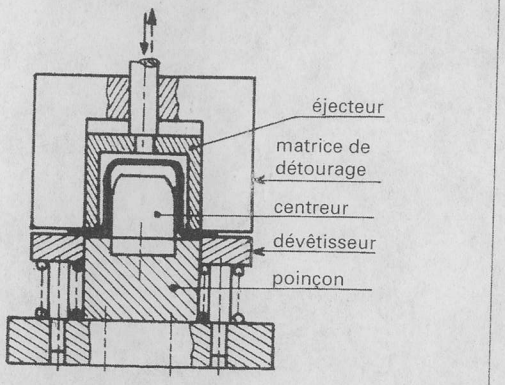


FIGURE 4.35 Schéma d'outil de détourage.

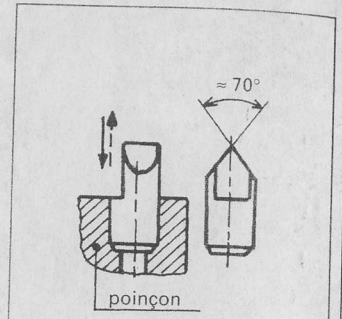


FIGURE 4.36 Coupe-déchet pour petite pièce.

Outil de coupe en longueur

Outillage du type à suivre, pour poinçonnage de coupe en longueur et d'ajourage dans la bande.

Poinçon. De faible largeur (5 à 10 mm) limitant la perte de matière. De longueur supérieure à la largeur de bande (environ 1 mm par côté) (fig. 4.37).

Utilisation. Découpe, dans la bande de largeur du produit fini, de pièces longues avec un profil donné et poinçonnage en bout de pièce simultanément.

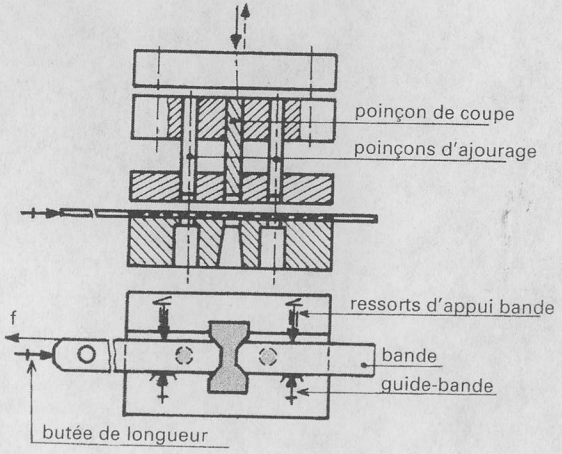


FIGURE 4.37 Schéma d'outil de coupe en longueur.

Outillage de crevage

Outillage de découpe partielle (sur 3 côtés) et de cambrage simultané d'un ajour (fig. 4.38).

Poinçon. Il comporte un angle de coupe avec arête coupante et un rayon du côté du pliage.

Poinçon pour ouïe. Il comporte un arrondi sur les bouts et l'arrière, l'ouïe s'obtenant par allongement du métal.

Utilisation

Petite série. Avec un outillage spécifique (production flexible avec machine à CN).

Grande série. Dans un outillage combiné.

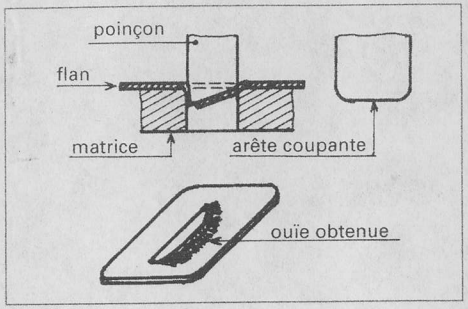


FIGURE 4.38 Poinçons d'outil de crevage (pour ouïe).

Outillage d'encochage

Outillage de découpe d'encoches sur le bord d'une bande ou d'un flan, soit sur 3 côtés (fig. 4.39 a et b).

Opposition à l'effet de chasse. Avec une plaque de réaction sur la matrice ou un talon sur le poinçon.

Utilisation

Petite série. Avec un outillage spécifique (production flexible).

Grande série. Dans un outillage combiné.

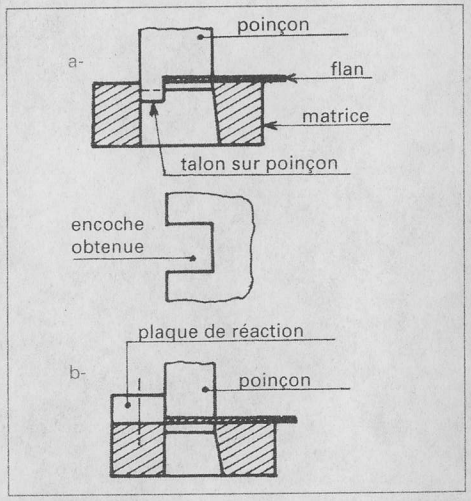


FIGURE 4.39 Schémas d'outils d'encochage.

6.3 Conception des outillages

L'outil de découpe comprend la matrice (la plaque de découpe) les poinçons et la plaque porte-poinçons (fig. 4.40).

Matrice

Elle doit résister à l'effort de découpe, son épaisseur est de 20 mm minimum (fig. 4.41).

On admet : 25 mm pour tôles à découper d'épaisseur $e < 2$ mm ; 30 mm avec 2 mm $< e <$ 3 mm ; 35 mm avec 3 mm $< e <$ 5 mm.

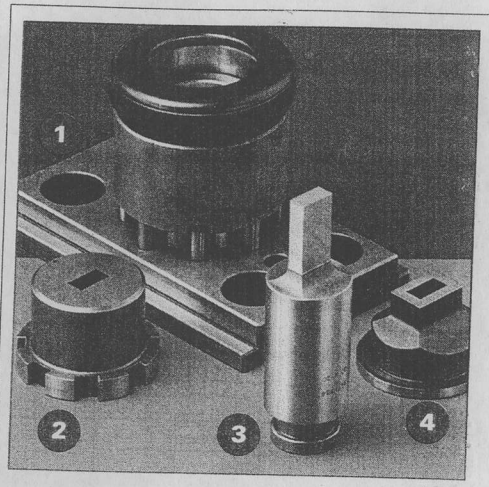
Découpe de fortes épaisseurs. Déterminer e en considérant une poutre chargée uniformément, reposant sur deux appuis.

Distance des bords d'entaille aux côtés de la matrice : on admet 30 mm minimum.

Dépouille du profil : 3°, après 5 mm non dépouillé.

Dépouille des trous : pour les trous plus grands que ≅ 1 à 2 mm.

Matrices avec éjecteur : la dépouille n'est pas nécessaire.



1, Plaque supérieure porte-poinçon
2. Matrice
3. Poinçon
4. Guide-poinçon dévêtisseur

FIGURE 4.40 Outil de centre d'usinage en poinçonnage-grignotage- pliage.
Doc. Baltec

Modules éléments de matrice

Conçus pour une forme donnée (trous, ajours) s'implantant dans une plaque porte-éléments modulaires: simplifie la fabrication de l'outillage (fig. 4.42).

Matrices de grandes dimensions

Réalisées par secteurs assemblés, avec des vagues de coupe répartissant l'effort de découpe (fig. 4.43).

Durée de vie

Production admise de 30 000 à 100 000 pièces entre deux affûtages.
On a: 5 mm non dépouillé moins 1 mm de réserve (limite des affûtages) = 4 mm utile;
Usure par affûtage = 0,4 mm admis;
4 mm/0,4 = 10 affûtages,
soit durée de vie: 300 000 à 1 million de pièces avant remplacement.
Affûtage : par rectification de la face supérieure.

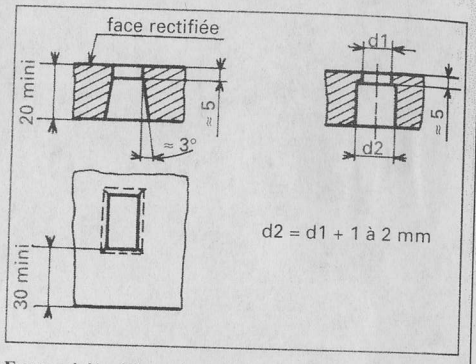


FIGURE 4.41 Dimensions des matrices.

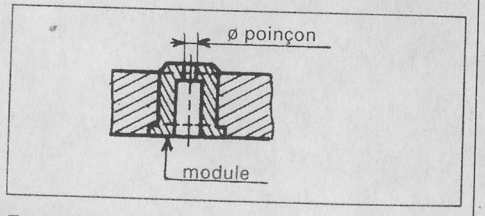


FIGURE 4.42 Module guide-poinçon.

Poinçon

Il doit résister à la compression et au flambage.
On admet sa longueur de 60 à 80 mm à section constante (pas de dépouille).
On vérifie la résistance au flambage par la formule

$$l \leq \pi \sqrt{\frac{E \cdot I}{F}}$$

avec: l = longueur du poinçon en mm;
E = module d'élasticité en N/mm²;
I = moment quadratique de la section en mm²;
F = effort de découpe en N.

Formes cylindriques:

$$l \leq \sqrt{\frac{\pi \cdot E \cdot 0{,}05\, d}{e.Rm}}$$

avec: d = Ø du poinçon;
e = épaisseur de la tôle;
Rm = résistance à la rupture par traction.

Pénétration du poinçon dans la matrice.
De quelques millimètres; nulle en découpe de carbures métalliques (matériaux très durs).

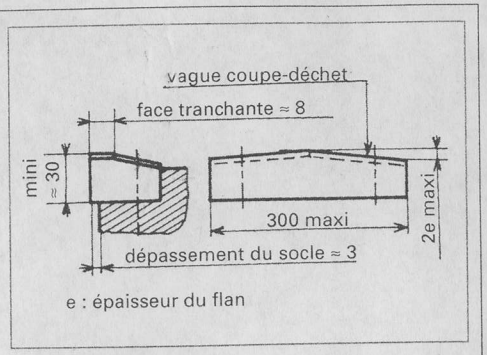


FIGURE 4.43 Secteur linéaire pour matrice grandes dimensions.

Poinçons de petite section

Sont épaulés avec rayon de raccordement; longueur utile: 10 à 15 mm maxi (fig. 4.44).

Poinçons multiples

Étager les groupes de poinçons d'une demi-épaisseur de la tôle à découper. Le poinçon de détourage (découpant la pièce) est le plus long.

Poinçons de grandes dimensions.

Comme les matrices, peuvent être conçus par secteurs implantés sur une semelle (fig. 4.45).
Modules support poinçons. Peuvent simplifier fabrication et maintenance, en particulier pour les gros outillages.
Plaque porte-poinçons. D'une épaisseur de 20 à 30 mm.
Durée de vie. Production admise de 10 000 à 40 000 pièces, selon les matériaux à découper.
Durée de vie identique à la matrice: nombreux affûtages possibles (sections constantes), par rectification de la face de découpe.

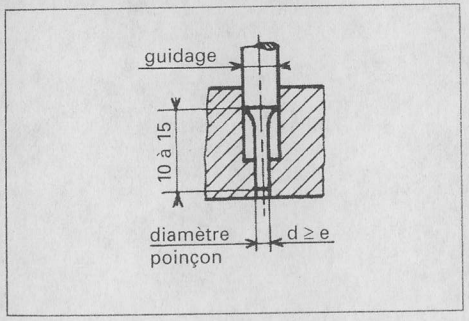


FIGURE 4.44 Poinçon de petite section.

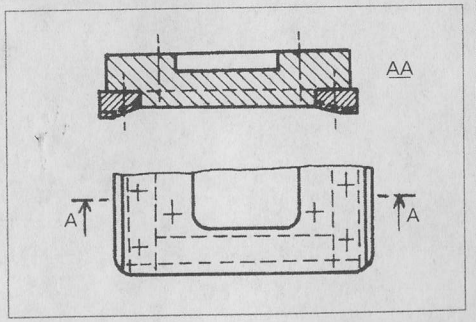


FIGURE 4.45 Schéma de secteur sur poinçon de grandes dimensions.

Matériaux.

Matrice. Généralement, en acier Z200 C12, traité à HRC ≃ 58.
Poinçons. Même matériau que matrice, traité à HRC ≃ 62.

Ajustement poinçon matrice

La découpe provoque un fissurage oblique du métal, nécessitant un jeu fonctionnel entre poinçon et matrice, en fonction du matériau et de l'épaisseur *e* à découper.

Jeu fonctionnel.

On admet: Acier doux, cuivre, laiton: 0,05 *e*; acier demi dur: 0,06 *e*; acier dur: 0,07 *e*; alliages d'aluminium: 0,10 *e*.
Affectation du jeu. Au poinçon ou à la matrice, selon la forme à obtenir, flan ou ajour, soit: (fig. 4.46).

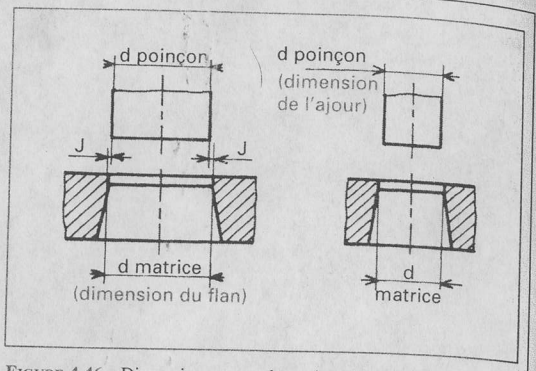


FIGURE 4.46 Dimensionnement des poinçons et matrices.

Dimensionnement	Découpe extérieure (des flans)	Découpe intérieure (des ajours, des trous)
Matrice	Cotes du flan (forme à obtenir).	Cotes de l'ajour augmentées du jeu fonctionnel.
Poinçon	Cotes du flan diminuées du jeu fonctionnel.	Cotes de l'ajour (forme à obtenir).

Effort de découpe

Coupe franche. La surface du poinçon est en totalité au contact de la tôle; on a F = k.Rc.l.e, avec: F en daN;
k = coefficient de cisaillage (0,8 en coupe franche);
Rc (daN/mm^2) = résistance de rupture au cisaillement;
l (mm) = périmètre de la surface cisaillée;
e (mm) = épaisseur de la tôle.
Résistance au cisaillement Rc admise: Rc = 4/5 Re. On peut admettre Rc = Re (forces de frottement et usure outil).

Effort de découpe supérieur à la puissance machine (presse)

Pièces moyennes: Décaler en hauteur des groupes de poinçons par rapport à d'autres (de 0,5 *e*).
Grandes pièces: Découpe progressive avec vagues de coupe (exemple fig. 4.43).

Dévêtisseur et contre-plaque

Leurs épaisseurs sont de 20 à 30 mm.
Effort nécessaire au dévêtisseur:
- Découpe en pleine matière: environ 7 % de l'effort de découpe.
- Découpe partielle (encochage...): environ 3 % de l'effort de découpe.

Position du nez de broche

Centrer la partie supérieure de l'outillage sur le nez du coulisseau de la presse, au point d'application de la résultante des efforts de découpe, le barycentre (fig. 4.47).

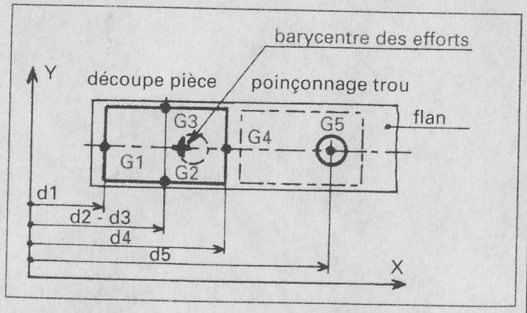


FIGURE 4.47 Position nez de broche sur plaque supérieure d'outil pour découpe et poinçonnage.

Barycentre des efforts de coupe. Déterminer la position de la résultante R des efforts par la méthode des moments, soit Mo×F = d.F, d'où Mo×R = Mo×F1 + Mo×F2 + etc.
Profil de découpe. Les arêtes de découpe sont décomposées en éléments simples dont l'effort appliqué au centre de gravité est proportionnel à la longueur.
Formes intérieures. Leur centre de gravité est au centre de leur surface.

6.4 Mise en bande des pièces

Positionnement des pièces à découper dans la bande ou le rouleau.

Position des découpes

En continu sur la bande ou le rouleau et orientées pour obtenir un minimum de déchets (fig. 4.48).
Coefficient d'utilisation. Surface des pièces découpées/surface de la bande; on admet 0,65.

Distance des découpes

Avec les bords de bande et entre elles: admis égal à l'épaisseur de la tôle, avec un minimum de 2 mm.

Nota: Pour un minimum de perte, découper éventuellement dans la bande en deux passages, avec retournement.

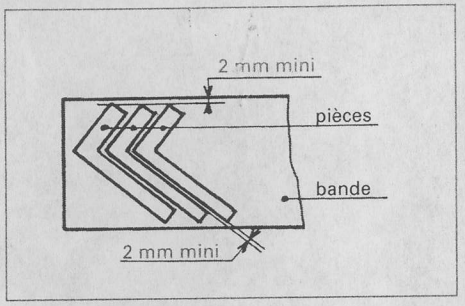


FIGURE 4.48 Mise en bande de pièces.

Pièces circulaires. Les flans peuvent être tangents; respecter la distance aux bords de bande.
Pièces à cambrer. À positionner dans la bande en considérant le sens du laminage (par rapport au sens du cambrage) (voir chapitre « Procédés de formage »).

Répartition des poinçons d'ajourage

S'effectue après la mise en bande.
Espacer les poinçons entre eux, isolément ou en groupes, pour ne pas affaiblir la matrice (fig. 4.49).
Décomposer un ajour en formes simples à obtenir avec plusieurs poinçons ou groupes de poinçons espacés.

Ébauches

Bandes. Cisaillées dans la tôle (de 1 × 2 m) à la largeur nécessaire pour les pièces à découper.
Rouleaux. De largeur 1 à 500 mm.

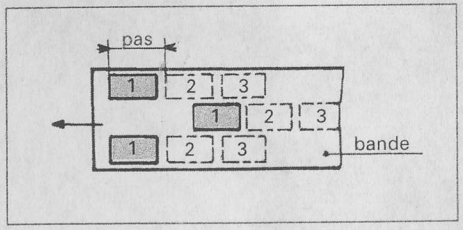


FIGURE 4.49 Répartition des poinçons sur outil de découpe.

6.5 Machines

Presses à colonnes. La conception assure la rigidité nécessaire sous les efforts de découpe importants et répétés.

Presses à col de cygne. Machines de petites dimensions : puissance peu importante ; cadence de frappe élevée (jusqu'à 400 coups/min).
Pour la découpe de petites pièces.

Avance bande

Jusqu'à 100 m/min, avec une précision de positionnement de 0,2 mm sur MOCN.

Vitesse de découpe

Mouvement du poinçon ou de la matrice, relativement lent sur grosses machines (12 m/min dans matériaux durs).

Amenage

Alimentation du brut sous la presse.
En bande. Amenage avec guides (longueur de bande = 2 m) ; bandes de 1 m : possibilité sans guide.
En rouleau (plusieurs centaines de mètres) : automatisation de la production.

Presses à commande numérique

La CN gère :
Course avec limites des vérins de frappe (points morts haut et bas) ;
Vitesse de découpe (modulable permettant la réduction de déformation de la pièce et du bruit de frappe).

Centres de découpe

Ensemble machine « Trumatic 500 rotation » de TRIUMPH.
Usinage direct dans la tôle (pas de bande à couper préalablement) en poinçonnage-grignotage-découpe en continu.
Des outils standards (section cylindrique, prismatique...) sont stockés en magasin-machine : poinçonnage et découpe d'ajours de tous types par rotation angulaire de l'outil (suivi de profil).
Chaque outil peut comporter plusieurs empreintes différentes (fig. 4.50).
L'ensemble outil (poinçon, matrice, éjecteur) peut être stocké en cassette optimisant le chargement en magasin-machine (fig. 4.51).
La CN peut gérer : mouvement de positionnement de la tôle à vitesse rapide (en X Y) avec précision (≅0,2 mm) et répétabilité excellente (≅0,05 mm) ; évacuation des pièces et débouchures ; axe Z pour crevage ; contournage des profils à cadence de frappe élevée (jusqu'à 900 cp/min).
Avec programmation interactive, CAO intégrée ou/et transférée...
Utilisation. Production flexible en unitaire à petite série, directement dans la tôle, de pièces complexes (quels que soient le nombre d'ajours et les profils à obtenir) (fig. 4.52).
Machines à col de cygne avec table de grande dimension (≅2 500 × 1 300 maxi) (fig. 4.53).

Cellule d'usinage

Groupage d'opérations : poinçonnage, découpe, grignotage, pliage, emboutissage, estampage, permettant la production flexible de petites pièces en tôle d'épaisseur maximale 4 mm.
Autonomie de fonctionnement : chargement des tôles avec disposition des ventouses de préhension ; évacuation des squelettes avec rangement ordonné...

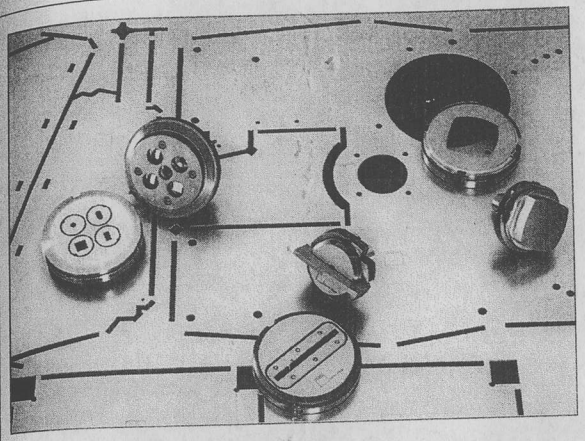


FIGURE 4.50
Poinçons et matrices de centre d'usinage de la tôle en poinçonnage-grignotage-formage « Trumatic ».
Doc. Trumph

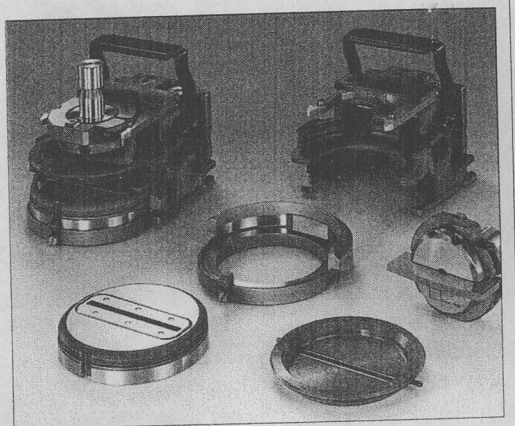


FIGURE 4.51
Cassette support-outil de poinçonnage-grignotage à charger sur machine.
Doc. Trumph

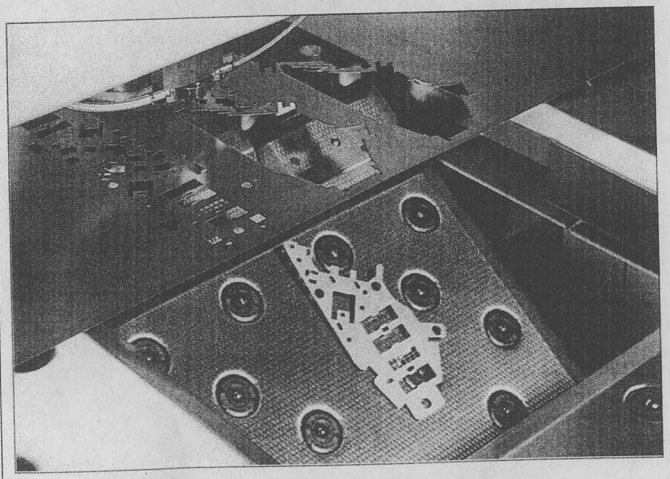


FIGURE 4.52
Pièces produite et en cours de fabrication sur machine « Trumatic ».
Doc. Trumph

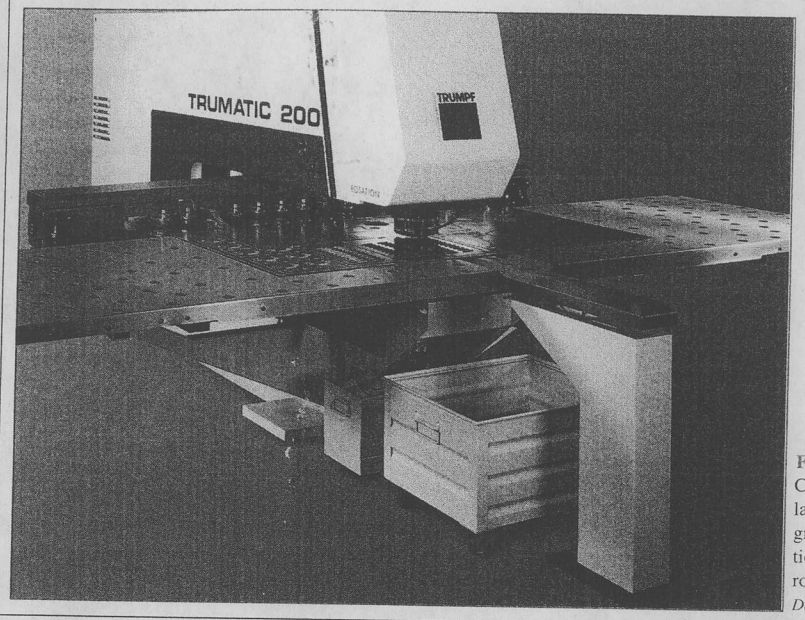


FIGURE 4.53
Centre d'usinage de la tôle (poinçonnage-grignotage-déformation) «Trumatic 200 rotation».
Doc. Trumph

6.6 Découpage fin

Découpe de précision
L'outillage doit produire des pièces finies (découpées et formées si nécessaire).
Conception à colonnes: doit assurer un parfait guidage poinçon matrice.

Matrice

Elle comporte un faible rayon d'entrée (1/10 épaisseur tôle à découper) sur la périphérie du profil découpé: provoque le filage du métal (élimination partielle de l'arrachement).

Plaque de pression

Elle comporte un jonc en saillie, de section triangulaire contournant le profil à découper (fig. 4.54): maintien de la tôle durant la découpe.
Découpe de tôles épaisses ($e > 4$ mm): deux joncs décalés, en opposition (un jonc côté poinçon et un jonc côté matrice) (fig. 4.55).

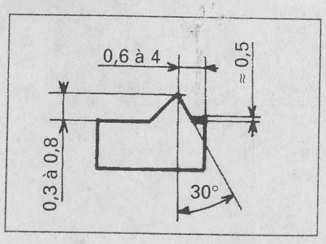


FIGURE 4.54 Jonc de maintien de bande.

Éjecteur

Maintenu en pression sous la forme à découper: réduit les déformations sur la pièce et évacue la pièce finie.

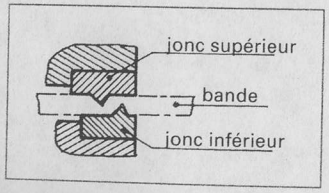


FIGURE 4.55 Double jonc de maintien de bande épaisse (> 4 mm).

Jeu fonctionnel

Il est réduit au minimum: environ 1/100 de l'épaisseur de la tôle à découper.

Effort de découpe

Il est plus important qu'en découpe classique. On a: Force de découpe F1 ≃ l.e.Rc + F2, avec F2 ≅ 0.6 F1 (forces de pression du jonc et de la plaque de pression).

Précision

État de surface: R = 1 à 5 µm; dimensions, de qualité 7.

Mise en œuvre

Conception outillage

Généralement combinaison découpe - formage - poinçonnage - estampage partiel.
Cycles de production. Possible en plusieurs séquences: découpe du profil extérieur, transfert dans l'outillage, poinçonnage et formage.
Conception très précise: coût de fabrication 50 % supérieur aux outillages combinés (outil suisse).

Découpe de petites pièces

Comportant peu de poinçonnage et crevage (formes intérieures): concevoir l'outillage à poinçon mobile.

Découpe de grandes pièces

Comportant un grand nombre de formes intérieures à découper: outillage à poinçon fixe.

Découpe en grande série

Production en une frappe, de pièces peu épaisses (quelques mm) et de forme complexe: associer le formage (pliage) à la découpe (découpage, poinçonnage, crevage).

Matériaux pièces

Doivent avoir une excellente déformabilité à froid (aciers, laitons, alliages d'aluminium).

Utilisation

Production de petites pièces directement au profil fini (dont le formage), en grande série (automobile, cycle, horlogerie, photographie...).
Les presses utilisées sont à triple effet, assurant successivement pression sur la tôle, découpe et éjection de la pièce.

6.7 Grignotage

Découpe de formes par poinçonnages successifs de débouchures de petites dimensions, suivant le profil à obtenir (fig. 4.56).
L'outil de section, généralement cylindrique, contourne le profil à cadence de frappe élevée et avance programmée (par CN) (fig. 4.57).
Une forte pression du presse-tôle assure la découpe franche.
Utilisation. Sur centre de poinçonnage-grignotage-déformation, en production flexible de pièces en tôle de tous profils, unitairement à petites séries (non-nécessité d'outillage spécifique).

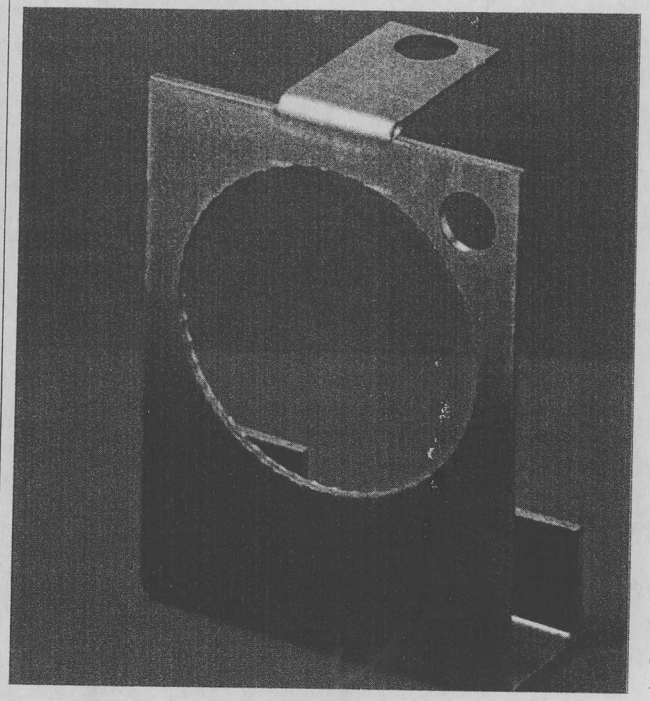
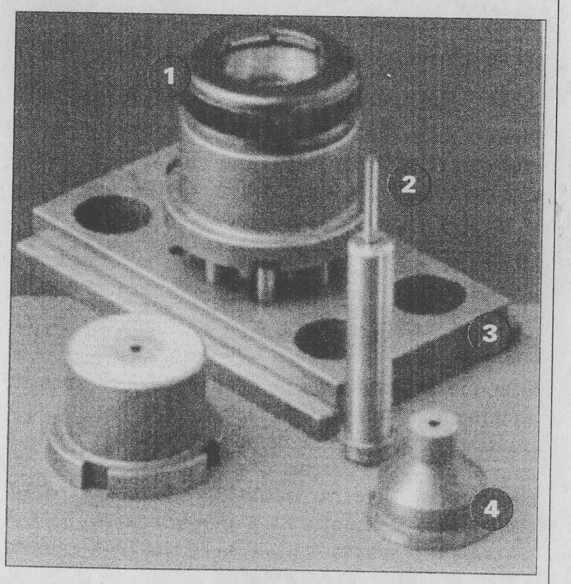


FIGURE 4.56 Alésage-ébauche obtenu en grignotage.
Doc. Baltec



1. Système de fixation poinçon
2. Poinçon de grignotage
3. Plaque porte-poinçon
4. Guide-poinçon

FIGURE 4.57
Outil de grignotage.
Doc. Baltec

7. Découpe par cisaillage, tronçonnage, sciage

7.1 Cisaillage

Généralités

Découpe linéaire des tôles (découpe de flans...) par sectionnement entre deux lames opposées, l'une étant fixe et l'autre mobile.
Décohésion du matériau. Identique à la découpe par poinçonnage (fig. 4.58).
Jeu fonctionnel. Espacement des deux lames favorisant le phénomène de rupture du matériau et améliorant l'état de surface. On admet un jeu j = 0,03e (e = épaisseur à découper).
Méthode de cisaillage. Selon les machines, en coupe droite (simultanément sur toute la longueur de tôle) ou en coupe progressive.
Précision de découpe. Quelques dixièmes de millimètre (0,2 à 0,8 mm).

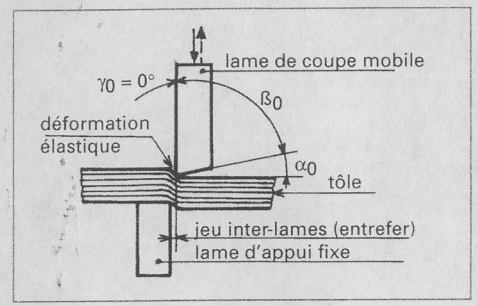


FIGURE 4.58 Mode d'action du cisaillage.

Effort de cisaillage Rc. Environ 0,8 Re. On admet Rc ≅ Re (frottements et usure des arêtes de coupe).

Cisaillage en coupe droite

Il s'effectue entre deux lames rectilignes opposées et parallèles, sur toute la longueur de la pièce (fig. 4.59).
Capacité de cisaillage
Longueur: celle des lames (1 à 6 mètres, selon les machines).
Épaisseur: Maximale de 20 mm (grosses machines).
Angles de coupe
Taillant β_o: généralement 90°, permettant d'avoir deux arêtes de coupe, par retournement de la lame.
Inclinaison d'arête λ_s = 0°30 à 2°: facilite la coupe par sa progressivité et diminue l'effort de cisaillage; inconvénient: provoque le vrillage des découpes de faible longueur.

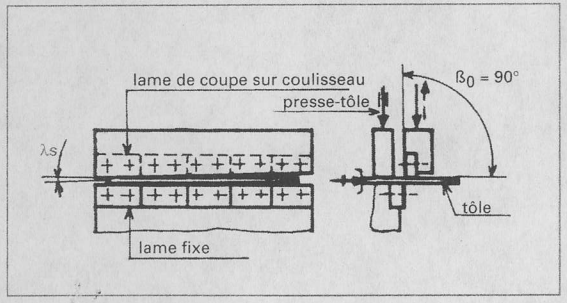


FIGURE 4.59 Schéma du cisaillage à coupe droite.

Affûtage des lames. Essentiellement sur la face de coupe.
Presse-tôle. Il s'oppose au basculement de la tôle (effort de découpe important).
Utilisation. Découpe dans la tôle brute, des flancs et de pièces rectilignes de grandes dimensions (plusieurs mètres) en production unitaire et de série (machines à CN).

Cisaillage en coupe progressive

Découpe en continu. Deux lames circulaires motorisées provoquent l'avancement de la tôle à découper (fig. 4.60).
Machines. Elles sont équipées de lames à axes parallèles ou à axes inclinés.

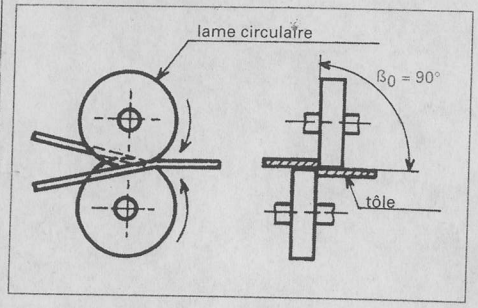


FIGURE 4.60 Schéma du cisaillage à lames circulaires (coupe rectiligne).

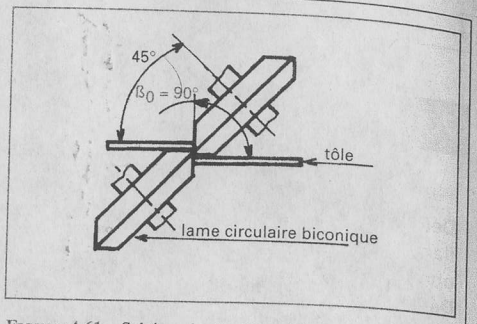


FIGURE 4.61 Schéma du cisaillage à lames circulaires biconiques (détourage).

Angle d'inclinaison d'arête : obtenu par la position relative des deux lames réglées pour permettre l'entraînement de la pièce (15 à 20°).
Utilisation. Découpe en continu de grandes longueurs.
Détourage de pièces préalablement embouties d'épaisseur maxi = 2,5 mm avec lames circulaires biconiques (fig. 4.61).

7.2 Tronçonnage à l'outil de coupe

Généralités

Opération de tournage à l'outil de coupe pour débiter des pièces de forme cylindrique, brutes ou terminées d'usinage (voir chapitre « procédés de tournage »).
Outil utilisé : à tronçonner : lame de forme d'une faible épaisseur pour limiter la perte de matière (fig. 4.62).

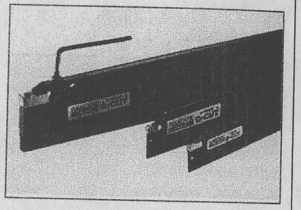


FIGURE 4.62 Outils de tronçonnage (en tournage).
Doc. Coromant Sandwik

Écoulement du copeau.
Favorisé avec un angle d'inclinaison d'arête (aciers ≅ 10° ; alliages d'aluminium ≅ 20°) : évite le bourrage du copeau dans la gorge.

Fragmentation du copeau. Avec une arête de coupe incurvée ou à deux inclinaisons d'arête opposées (fig. 4.63).

FIGURE 4.63 Plaquette de tronçonnage (profondeur limitée).
Doc. Coromant Sandwik

Conditions de coupe

Celles du tournage en général.
Vitesse de coupe. En tronçonnage profond : à réduire de moitié environ (porte-à-faux de lame pouvant entraîner des vibrations).
Vitesse d'avance. Éventuellement, à réduire pour éviter des vibrations et pour les lames minces.

Utilisation

En tournage de pièces dans la barre : débit après réalisation, de la production unitaire à la grande série (décolletage de petites pièces...).

7.3 Tronçonnage aux outils tournants : meule et fraise-scie

Les capacités de coupe sont limitées par le diamètre de l'outil (rayon d'outil moins rayon des bagues de maintien).

Tronçonnage à la meule

Outil meule. Disque armé de fibres métalliques ou Nylon. À utiliser aux conditions de coupe du meulage rectification. La vitesse maximale est indiquée sur chaque meule (sécurité d'utilisation pour éviter l'éclatement).

Tronçonnage à la fraise-scie

Appelé également sciage.
Outil. Lame circulaire avec dents de coupe.
Conditions de coupe. Celles du fraisage, en général (voir chapitre « procédés de fraisage »).
Vitesses d'avance. À réduire de 20 à 50 % environ selon la profondeur de passe : grand nombre de dents en prise fragilisant l'outil.
Fragmentation du copeau obtenu avec une denture à inclinaison d'arête alternée.

Machines

Travaux de série. Machines automatisées, avec réglage aux différents angles de découpe (programmation numérique).
Travaux unitaires. Petites machines à avance manuelle.
Travaux de fraisage. Opération de réalisation de rainures étroites.
Utilisation. Opérations, avec meule ou fraise-scie, de débits d'ébauche dans des barres (sections diverses), des tubes, des profilés divers, en production unitaire et de série.

7.4 Sciage

Opération d'usinage par coupe : débit de bruts dans la barre, avec des machines à lame de coupe linéaire courte ou « continue ».

Sciage avec lame courte

Mouvement rectiligne alternatif de l'outil.
Retour du cycle : l'outil est soulevé, évitant la détérioration des dents.
Outil : lame à dents multiples, généralement en acier rapide, non réaffûtée.
Utilisation. Débit dans la barre, en production unitaire et de série de bruts pour usinage (tournage, fraisage...).

Sciage avec lame continue

Mouvement continu de l'outil.

Outil. Ruban circulaire, en acier rapide s'affûtant sur machine automatique.

Mouvement d'avance. Donné à la pièce, suivant une trajectoire pouvant être variable (faible largeur de lame).

Utilisation. Découpe de jets de coulées sur pièces de fonderie, de dimensions peu importantes, en travail unitaire ou en petite série ; débit dans la barre (fig. 4.64).

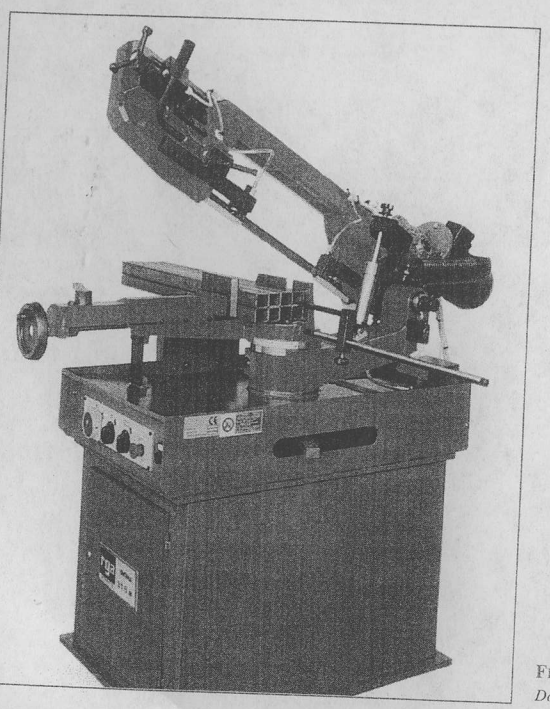


FIGURE 4.64 Scie à ruban.
Doc. RGA. industries

5 PROCÉDÉS D'ÉROSION

1. Différents procédés d'érosion 143
2. Électroérosion 143
   - 2.1 Généralités 143
   - 2.2 Principe 143
   - 2.3 Disymétrie de l'érosion 145
   - 2.4 Générateur d'impulsions 145
   - 2.5 Diélectrique 145
   - 2.6 Arrosage 147
   - 2.7 Gap 147
   - 2.8 Matériaux usinés 147
   - 2.9 Précisions obtenues 148
   - 2.10 Productivité 149
   - 2.11 Électrodes-outils 149
   - 2.12 Porte-pièces 151
   - 2.13 Machines d'enfonçage 153
   - 2.14 Machines à fil 155
   - 2.15 Machines de détourage ou « fraisage en électroérosion » 156
   - 2.16 Utilisation 156
3. Électrochimie 157
   - 3.1 Généralités 157
   - 3.2 Électrolyte 157
   - 3.3 Conditions technologiques 158
   - 3.4 Précisions obtenues 158
   - 3.5 Matériaux usinés 158
   - 3.6 Électrodes-outils 158
   - 3.7 Outillage 158
   - 3.8 Mise en œuvre 159
   - 3.9 Sécurité 160
   - 3.10 Machines 160

4. Usinage chimique 161
4.1 Généralités 161
4.2 Matériaux usinés 161
4.3 Mise en œuvre 161
4.4 Utilisation 161
4.5 Sécurité 162

1. Différents procédés d'érosion

Les procédés d'érosion permettent de réaliser des usinages de forme pouvant être complexes, en une phase, dans des matériaux métalliques quelle que soit leur dureté.

Électroérosion

Enlèvement de la matière par une succession de décharges électriques, avec outil de forme ou outil d'enveloppe.

Électrochimie

Enlèvement de la matière par dissolution anodique, avec outil de forme (statique ou dynamique) dirigeant l'électrolyte.

Usinage chimique

Enlèvement de la matière par érosion à l'aide d'un agent oxydant.

2. Électroérosion

2.1 Généralités

L'électroérosion ou étincelage s'effectue suivant trois types d'usinage : en enfonçage avec outil de forme ; en découpe avec outil-fil ; en détourage ou fraisage avec outil tournant.

2.2 Principe

Enlèvement de matière sur une pièce métallique par une succession de décharges électriques à haute fréquence, non stationnaires, de très courte durée (quelques micro à quelques millisecondes) (fig. 5.1).

Canal ionisé

Chaque décharge électrique se concentre sur une très petite zone qui est portée aux points de fusion et d'évaporation provoquant l'élimination d'une faible quantité de matière.

La très courte durée de la décharge ne permet pas la diffusion de la chaleur dans la pièce.

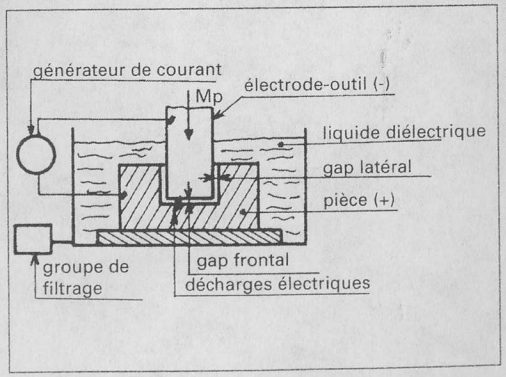


FIGURE 5.1 Schéma de principe de l'électroérosion.
(d'après Charmilles Technologies)

Les décharges sont appliquées entre l'électrode-outil et la pièce qui ont chacune une polarité différente, en immersion dans un liquide non conducteur, le diélectrique (fig. 5.2).
L'électrode-outil, généralement à polarité négative, et la pièce à polarité positive, sont soumises à une différence de potentiel créant un champ magnétique.

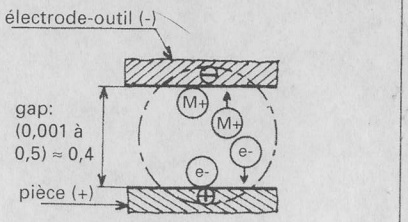


FIGURE 5.2
Canal ionisé provoqué par la décharge électrique avec plasma constitué d'atomes métalliques M (ions positifs) et d'électrons e.

Phénomène de l'enlèvement de matière

Il est à la fois électrique, thermique et mécanique (fig. 5.3).
Une décharge électrique s'amorce en appliquant une tension supérieure à la tension de claquage, en fonction de la distance électrode-outil/pièce et du pouvoir isolant du diélectrique.
Au point où la distance électrode-outil/pièce devient la plus faible – quelques centièmes de mm –, les électrons de l'outil, attirés par la pièce, provoquent un canal ionisé dans le diélectrique où passe le courant produisant une étincelle et formant un plasma (8 000 à 12 000°) avec fusion instantanée des électrodes (pièce et outil) produisant un cratère dissymétrique entre les polarités.
Une bulle de vapeur se forme et lorsque le passage du courant s'interrompt après la fusion, la bulle implose sous l'abaissement de température, projetant la matière fondue qui se disperse, solidifiée en sphérules s'évacuant dans la circulation du diélectrique.
Ce cycle d'étincelage dure quelques microsecondes et se répète au nouveau point où la distance outil/pièce est la plus rapprochée.

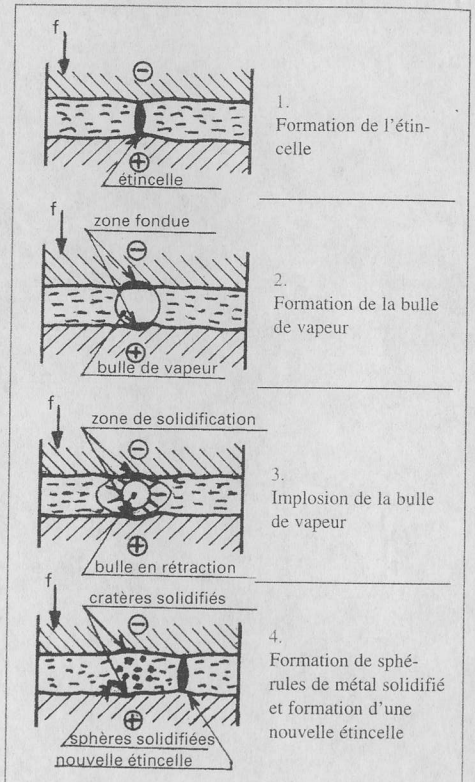


FIGURE 5.3 Phénomène d'enlèvement de matière.

2.3 Dissymétrie de l'érosion

L'érosion dissymétrique sur les électrodes pièce et outil est due à :
conductibilité thermique, température de fusion des matériaux, durée et conductibilité des échanges.
Grande dissymétrie (de 1 à 0,1 % de l'érosion sur l'outil).
S'obtient en influençant la décharge par la variation de l'intensité, de la polarité et de la durée du cycle.
État de surface à obtenir. Plus il doit être précis, plus l'usure volumétrique de l'électrode-outil sera grande.
Usure de l'électrode. Elle dépend également de son matériau constitutif et de la nature du diélectrique.

2.4 Générateur d'impulsions

Son action permet : de disposer d'une tension suffisante d'amorçage (supérieure à la tension de claquage du diélectrique) ; de maintenir la décharge en limitant le courant et sa durée ; d'assurer des décharges répétitives.

Générateurs multicanaux

Permettant d'utiliser un courant important en ébauche et une faible intensité en finition, avec peu d'usure de l'électrode-outil et débit relativement grand.

2.5 Diélectrique

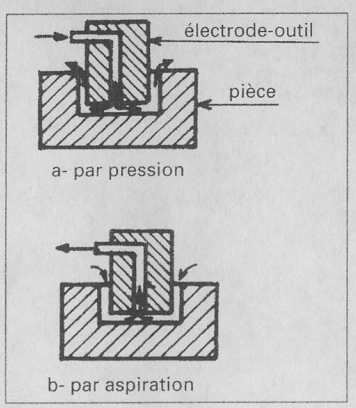


FIGURE 5.4 Arrosage de la zone d'usinage par l'électrode-outil.

Le liquide diélectrique assure :
Le passage du courant entre les deux électrodes (outil et pièce) à partir du courant de claquage.
L'évacuation des sphérules métalliques (micro-copeaux) par circulation-injection.
« L'arrosage », en refroidissant les électrodes (fig. 5.4 et 5.5).

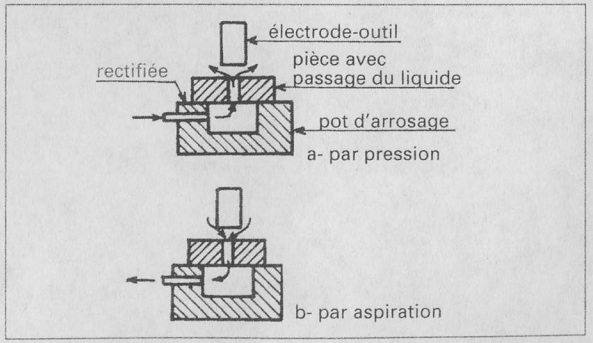


FIGURE 5.5
Arrosage de la zone d'usinage par la pièce.
(d'après Charmilles Technologies)

Caractéristiques

Volatilité. Peu volatil, pour limiter son renouvellement.
Viscosité. La plus faible possible pour favoriser l'arrosage (particulièrement en débit important : ébauche, grande surface à usiner).
Point d'inflammabilité. Élevée pour réduire la formation de bulles de gaz (viscosité).

Recyclage

Effectué par filtration à 5 µm.
Nécessaire pour ne pas avoir une trop forte concentration de particules de métal en suspension (éviter les arcs électriques, bien que ces particules métalliques facilitent les décharges) (fig. 5.6).

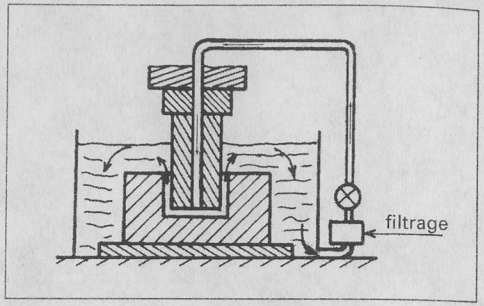


FIGURE 5.6 Schéma de circuit du liquide d'arrosage par pression.

Différents diélectriques

En usinage par immersion de la pièce dans le diélectrique (cas général), il faut une stabilité thermique du liquide dans l'enceinte d'électroérosion (fig. 5.7).
On utilise de l'eau déionisée et les hydrocarbures.

Eau déionisée

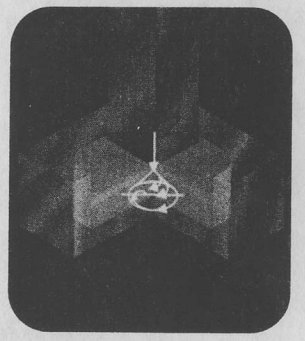
Utilisée pour la découpe au fil et le micro-usinage.
La déionisation asservie assure un niveau bas et constant de conductibilité du diélectrique, permettant d'obtenir un excellent état de surface.

Pétrole

De faible viscosité, il est utilisé pour les usinages fins et le carbure.

Huile

Selon sa viscosité (6 à 20 cst), est utilisée pour l'usinage de pièces de rugosité peu précise (grosses pièces).



Usinage orbital mode normal
Usinage en plongée suivi d'orbites. Permet l'usinage, de l'ébauche à la finition, d'empreintes de formes tridimensionnelles. Axes d'usinage X, Y ou Z.

Pièce en acier traité.

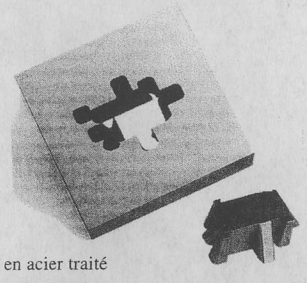
FIGURE 5.7 Exemple d'usinage par immersion.
Doc. Charmilles Technologies

2.6 Arrosage

Il s'effectue par :
L'outil. Au centre ou latéralement.
La pièce. En pression, aspiration ou combiné pression-aspiration.

Usinage par aspersion (cas de la découpe au fil)

La zone de travail doit être tempérée et le générateur doit s'adapter aux différents régimes (fig. 5.8).


Pièces en acier traité

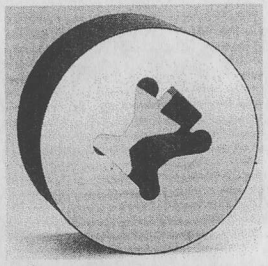

Pièces en carbure

FIGURE 5.8 Exemples d'usinage par aspersion (découpe au fil)
Doc. Charmilles Technologies

Débit

Pour assurer une érosion optimale, il est nécessaire d'avoir un débit d'arrosage précis.

2.7 Gap

Distance entre l'outil-électrode et la surface travaillée. Il varie de 0,001 à 0,5 mm, selon : le type d'usinage (ébauche, demi-finition, finition) ; l'étendue de la surface travaillée.
Il est maintenu constant par asservissement, contrôlé à l'aide d'un servo-mécanisme qui commande l'avance.

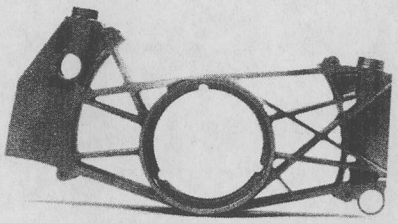
2.8 Matériaux usinés

L'étincelage s'effectue sur des matériaux métalliques de toutes duretés et réfractaires (aciers trempés, carbure, titane...).

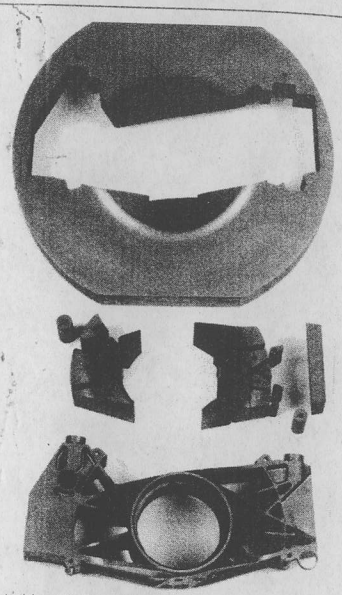
Dureté

Elle n'a aucun effet sur l'électrode-outil, qui est séparée de la pièce par le gap.
C'est l'action thermique de l'étincelage qui permet l'usinage de tous les matériaux métalliques (fig. 5.9).

Porte-moyeu avant



L'idée d'une fabrication du porte-moyeu arrière en un seul bloc a été appliquée sur le porte-moyeu avant avec le même succès : légèreté et résistance du titane, optimisation par calcul des forces exercées sur la pièce, économie de fabrication d'un gabarit de soudure, temps d'usinage réduit de 30 %, répétabilité parfaite...



Le bloc initial, les chutes et la pièce.

FIGURE 5.9 Pièce en titane réalisée en électroérosion. Pièce de formule 1 West McLaren Mercedes.

Doc Charmilles Technologies

Structure superficielle

Elle n'est pratiquement pas modifiée et l'aspect érodé est mat.
C'est la rapidité de la décharge électrique qui provoque la non-altération superficielle du matériau usiné.

Aspect de surface

L'aspect mat, de couleur gris clair des surfaces érodées, est dû à la lumière, qui, n'étant pas orientée, se réfléchit dans toutes les directions.

2.9 Précisions obtenues

État de surface

Jusqu'à 0,1 Ra pour l'acier et 0,2 Ra pour le carbure.
Il est d'autant meilleur que le courant est faible.

État de surface poli

Usinage à faible courant (et très faible débit) en passe de finition.

Précision dimensionnelle

Elle peut être de quelques µm.

2.10 Productivité

Débit de matière

Il varie de 15 mm^3/heure en usinage de grande précision à 7 000 mm^3/heure en ébauche, et selon la capacité des machines.

Temps d'usinage

Ils sont relativement courts, en considération des formes complexes pouvant être obtenues.

2.11 Électrodes-outils

Elles doivent être conductrices de l'électricité avec une température de fusion la plus élevée possible pour :
Résister aux étincelles jaillissant à haute température ;
Posséder une bonne conductibilité thermique assurant l'évacuation des calories.

Matériaux outils

On utilise généralement le graphite, le cuivre, le cupro-tungstène.

Graphite

Matériau prioritaire pour les électrodes-outils d'enfonçage, avec un très bon rendement dans la plupart des matériaux à usiner (fig. 5.10).
Grande résistance aux températures élevées ; faible coefficient de dilatation ; usinage par coupe facile (avec toutefois dégagement de poussière).
Classé en fonction de sa finesse de grains qui correspond à : densité, résistance mécanique, choix d'utilisation.
Ainsi, grains fins et forte densité permettent une faible usure d'outil et un débit moyen.

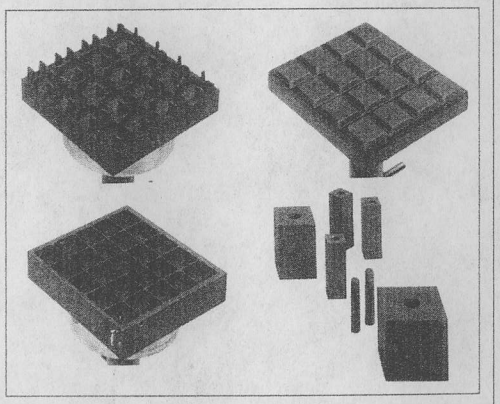


FIGURE 5.10 Électrode-outil d'enfonçage en graphite (ébauches standards pré-usinées). *Doc. revue Production Suisse*

Cuivre

Il a une excellente conductibilité thermique, mais une médiocre usinabilité par coupe.

Cuivre-graphite

Il a les caractéristiques favorables de ses deux matériaux constitutifs.

Cupro-tungstène

Il a des caractéristiques supérieures au cuivre, mais il est toutefois difficile à usiner par coupe.

Aluminium et laiton

Moulés pour de gros outils, ils ont une usure rapide, à compenser par l'utilisation de plusieurs outils successifs.

Laiton en fil

Utilisé systématiquement en découpe.

Choix du matériau outil

Il s'effectue en fonction du matériau à usiner et de la forme à obtenir, soit généralement :

Pièces en acier (traité ou non, réfractaire)

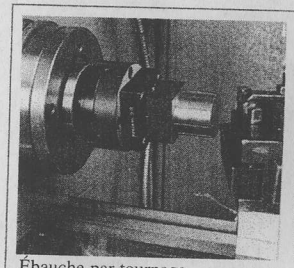
On utilise : le graphite en général ;
Le cupro-tungstène pour de très petites formes ;
Le cuivre pour obtenir un excellent état de surface.

Pièces en carbures métalliques, on utilise :

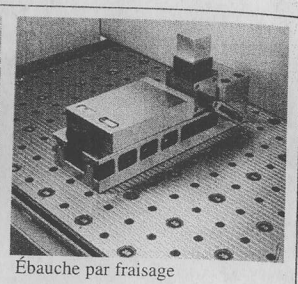
Le cupro-tungstène, en général ;
Le graphite pour les grandes dimensions.

Réalisation des outils de forme (pour enfonçage)

On l'effectue par différents procédés de fabrication : coupe, moulage, usinage chimique, découpe par électroérosion, assemblage... (fig. 5. 11).



Ébauche par tournage



Ébauche par fraisage

FIGURE 5.11 Usinage d'électrodes-outils d'enfonçage (en cuivre graphite) sur support.
Doc. System 3 R

Dimensionnement des sections d'outils

Il se détermine en fonction du gap et de la rugosité à obtenir : données de sous-dimensionnement d'après constructeurs, en fonction du réglage du générateur.

Outil d'ébauche

De section inférieure à celle de l'outil de finition correspondant : quelques dixièmes à quelques centièmes, selon les dimensions d'outil.

Porte-électrodes

De conception standardisée (modèles ITS de EROVA et ONE Minute Set-Up de 3R). Ils s'adaptent à toutes machines-outils, avec support (tours, fraiseuses, rectifieuses), pour : **Fabrication d'électrodes** sans démontage du support et accès avec un maximum de facilité. **Transfert de l'électrode** entre machines diverses, sans réglage et avec une grande précision (2 µm) (fig. 5.12, 5.13 et 5.14).

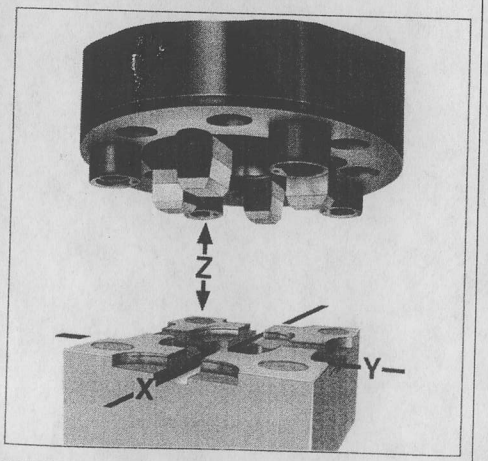


FIGURE 5.12
Porte-électrode adaptable sur différentes machines-outils.
Doc. System 3 R

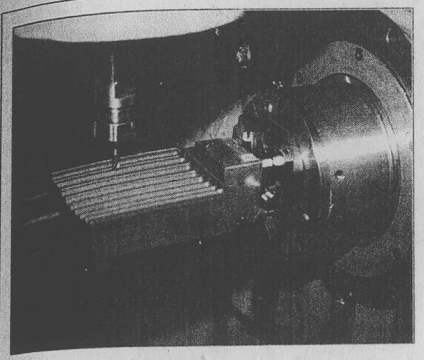
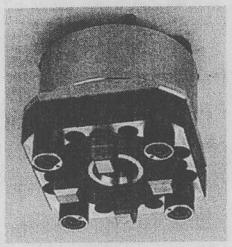
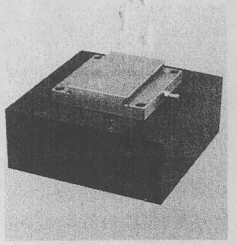


FIGURE 5.13 Maintien en position d'une électrode-outil en cours d'usinage, sur fraiseuse.
Doc. Erova



Support 3 R - 600-86 pour montage sur broche machine.



Support broche en queue d'aronde pour électrode Maxi.

Électrodes Macro et électrodes Mini et Micro avec leur élément de maintien sur machine.

FIGURE 5.14
Fixation d'électrodes sur supports porte-outil de machines d'enfonçage.
Doc. System 3 R

Ébauches d'électrodes de petites dimensions

Commercialisées en sections carrée ou cylindrique (fig. 5.14).

2.12 Porte-pièces

De conception modulaire, ils peuvent être installés par robot (automatisation totale et flexibilité) (fig. 5.15).
Le référentiel du porte-pièces (et du porte-outil) mémorisé dans la CN en permanence, accroît la productivité, la qualité et l'autonomie-machine (système EMS de 3 R).
La table porte-pièces doit être indéformable sous l'effet thermique et la charge des pièces (moules massifs).

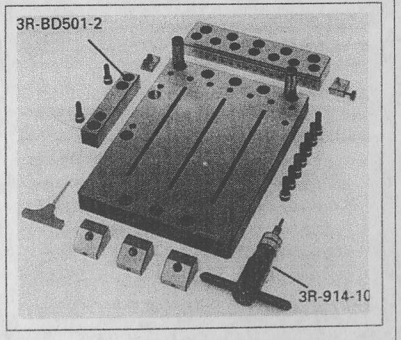


FIGURE 5.15 Porte-pièce(s) modulaire pour machines d'enfonçage.
Doc. System 3 R

Machines d'enfonçage

Des palettes à indexage précis (répétabilité à 5 µm) permettent :
la mise en position des pièces hors machine ;
l'usinage préalable de pièces installées sur palette adaptable à d'autres machines de production

(fraiseuses, rectifieuses planes...) et de mesure (fig. 5.16).

Machines à fil

En découpe de pièces peu épaisses, porte-pièces conçu avec des rails équipés d'éléments de maintien et de mise en position (avec référentiel de pièces différentes à usiner dans une phase (fig. 5.17).
La mise en position des pièces peut s'effectuer hors machine, avec butées et clames standardisées par des constructeurs (exemple: 3 R, Ruler System).
Des cadres porte-pièces constituent des palettes pour machine à fil.

Tables magnétiques

Spécifiques pour électroérosion (avec faible champ magnétique): maintien de pièces minces sans déformation éventuelle, avec référentiel (fig. 5.18).

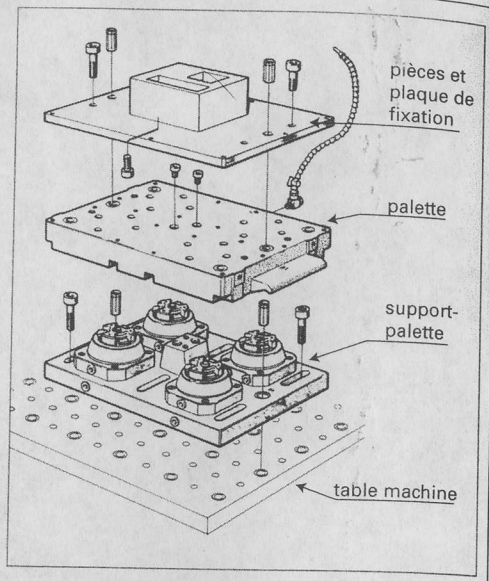
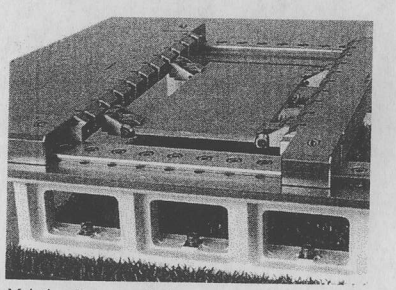
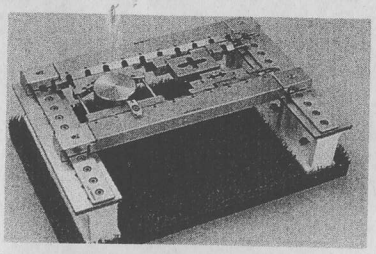


FIGURE 5.16 Palette porte-pièces avec élément de mise en position précise sur machine.
(Palette « Zéro fixe » de System 3 R)



Maintien d'une grande pièce.



Maintien de petites pièces.

FIGURE 5.17 Porte-pièces modulaires pour machines à fil.
Doc. System 3 R

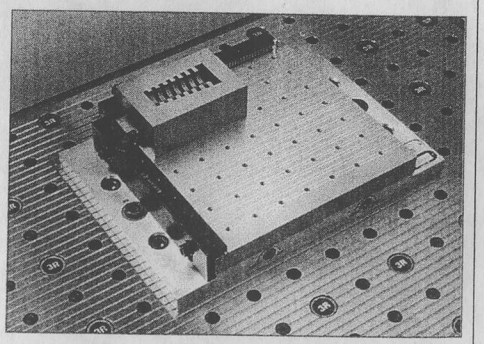


FIGURE 5.18 Table magnétique spécifique pour électroérosion.
Doc. System 3 R

2.13 Machines d'enfonçage

Généralement à quatre axes numérisés (XYZC) synchronisés et asservis en usinage.
L'axe C (rotation de la broche) permet d'optimiser la machine.
Capacité des machines: surface de table porte-pièces de 0,5 m^2 à plus de 2 m^2.
Magasin et changeur d'outils: permet l'usinage sans surveillance (fig. 5.19).
La broche et son support, conçus pour ne pas se déformer: sous l'action de la chaleur évacuée durant l'usinage; éventuellement, pour grosses machines, sous le poids de l'électrode (plusieurs centaines de daN).

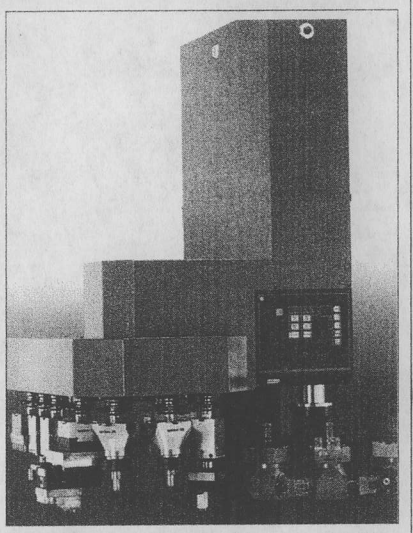


FIGURE 5.19 Magasin d'électrodes-outils avec chargeurs.
Doc. System 3 R

Commandes numériques

Programmation des déplacements au dixième de micron.
Avec cycles d'usinage intégrés par famille de pièces et formes paramétrées; technologie intégrée (type d'électrode utilisée, état de surface à obtenir, matériau à usiner (fig. 5.20).
Dispositif anti-collision généralement sur tous les axes (par détection d'efforts anormaux).
Logique floue (éventuellement) contrôlant les circuits, combinée à une commande adaptative.

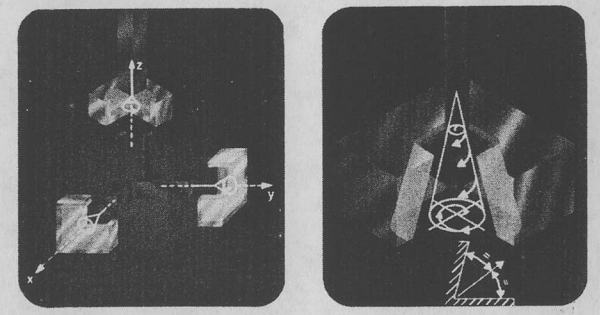


FIGURE 5.20
Cycle d'usinage de forme.
Doc. Charnilles Technologies

Usinage de forme conique, suivant X, Y ou Z.

Utilisation

Usinage en plongée

Suivant un des axes X, Y ou Z, principalement utilisé en ébauche de formes peu précises (fig. 5.21).

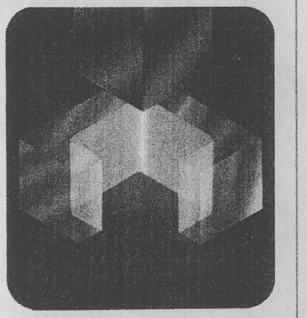


FIGURE 5.21
Cycle d'usinage ébauche en plongée.
Doc. Charnilles Technologies

Usinage directionnel

Obtention des angles intérieurs vifs, (usinage simultané sur plusieurs axes) (fig. 5.22).

Usinage vectoriel

Obtention de formes diverses avec des électrodes simples (section carrée, ronde) par la combinaison des mouvements tridimensionnels avec la rotation de la broche (fig. 5.23).

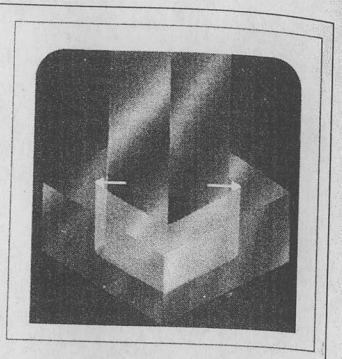


FIGURE 5.22 Cycle d'usinage directionnel. *Doc. Charnilles Technologies*

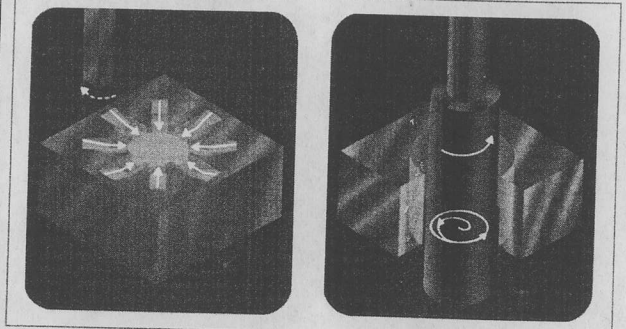


FIGURE 5.23
Cycles d'usinage vectoriel et orbital.
Doc. Charnilles Technologies

Usinage planétaire

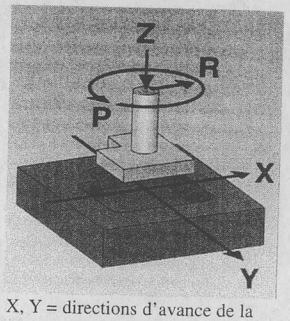
L'électrode se déplace dans le plan par rapport au centre de référence du profil à obtenir.
Réduit les temps de production (stabilité d'usinage) ;
Obtention d'états de surface identiques sur le fond et les parois d'une forme (fig. 5.24).

Usinage de formes coaxiales

Avec la broche rotative, réalisation de formes d'intérieur cylindriques, coniques, sphériques, hélicoïdales... (fig. 5.25).

Usinage de cavités profondes

(Évacuation difficile des micro-copeaux, rendant l'usinage instable).
La CN effectue la rétraction périodique de l'outil permettant la régénération du liquide diélectrique.



X, Y = directions d'avance de la table de travail
R = avance radiale
P = mouvement planétaire
Z = direction d'avance de la broche d'usinage

FIGURE 5.24 Cycle d'usinage planétaire. *Doc. System 3 R*

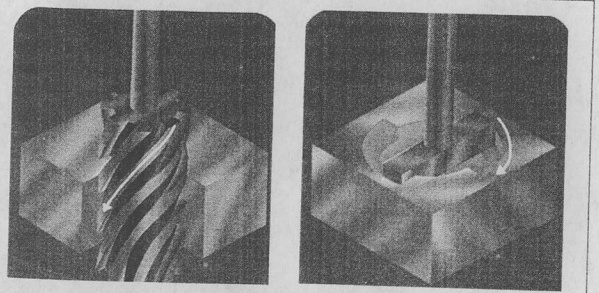


FIGURE 5.25
Cycles d'usinage rotatif et hélicoïdal.
Doc. Charnilles Technologies

2.14 Machines à fil

Elles permettent la découpe automatique de formes débouchantes diverses, avec ou sans dépouille, sous faible tension et peu d'énergie.
Généralement à cinq axes programmables (XYZUV) ; Les axes U et V permettent de réaliser des dépouilles simples et évolutives (jusqu'à 30°) (fig. 5.26).
Épaisseur découpée supérieure à 500 mm, selon les capacités machine.
Évacuation programmable des découpes (sur certaines machines), pour enchaîner les cycles d'ébauche et de finition.
Dépouille et contre-dépouille (sur outillages) effectuées en répétition de cycle.

Outil-fil

Diamètre de quelques dixièmes (0,2 en général) calibré avec précision.
Guidé de chaque côté de la pièce et recuit automatiquement durant son déroulement continu.

Vitesses de défilement

Elles sont variables en continu (quelques mm/seconde à 200 mm/s), programmables selon les conditions d'utilisation (épaisseur à découper, changement de direction...).

Commande numérique

Elle intègre l'asservissement de l'usinage.
Des programmes de découpe (dentures, ellipses, hyperboles, digitalisation de points pour formes quelconques...).
La gestion technologique (filtration, intensités de la pression, conductibilité du diélectrique, vitesse d'avance...).
La protection du fil de sa rupture dans les zones à risque (changement de section, entrée et sortie de pièce) (fig. 5.27).
(Découpe en régime de faible puissance avec temporisation, en fonction de l'épaisseur découpée).
Axe Z assurant, en continu, la longueur minimale du fil en travail.

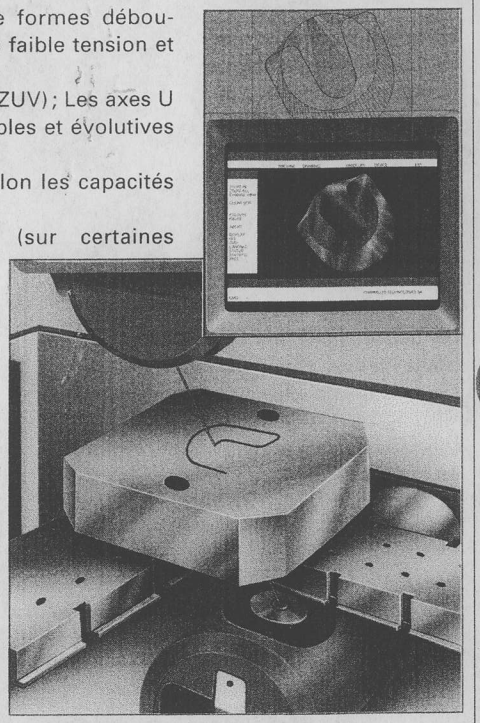


FIGURE 5.26 Découpe au fil (après création dessin géométrique et simulation) sur machine Robofil.
Doc. Charnilles Technologies

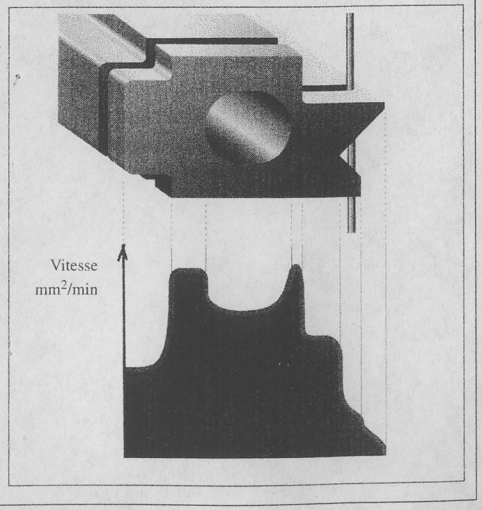


FIGURE 5.27
Asservissement de l'usinage en découpe au fil.
Doc. Charnilles Technologies

2.15 Machines de détourage ou « fraisage en électroérosion »

Usinage par contournage dans le plan XY, avec des électrodes rotatives (machine Robomill 200 de Charmilles Technologies) (fig. 5.28).
Stabilité d'usinage quelle que soit la profondeur de travail.
Meilleure précision avec l'évacuation rapide des micro-copeaux dans la zone de travail.

Outils-électrodes

De petits diamètres (1 à 12 mm), dans magasin avec changeur automatique ;
De section simple (cylindrique, carrée, rectangulaire) ;
Vitesses d'avance : de 0 à 3 600 mm/min, en continu ;
Rotation de broche : de 20 à 6 000 tr/min, en continu.

Commande numérique

Elle génère des cycles d'usinage divers avec résolution au demi-micron et compensation d'usure de l'électrode sur les trois axes.

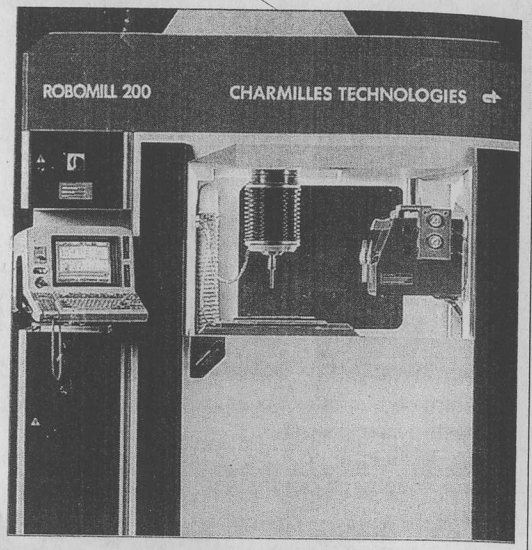


FIGURE 5.28 Machine d'électroérosion à broche tournante.
Doc. Charnilles Technologies

2.16 Utilisation

Pour les trois types de machines.
Production d'outillages de forme : moules d'injection, d'extrusion, de compression, de coulée, des matrices et poinçons de formage, forgeage, découpe (poinçon et matrice pouvant être obtenus simultanément avec machine à fil).
Production en petite série, de pièces prototypes précises, de pièces en matériau réfractaire, de formes d'intérieur (rainures, dentures...).

3. Électrochimie

3.1 Généralités

L'électrochimie consiste à enlever de la matière sur des pièces métalliques, par dissolution anodique dans une cellule d'électrolyte à haute densité de courant, l'électrode-outil étant la cathode (négatif) et la pièce l'anode (positif) (fig. 5.29).
La réaction chimique produit de l'hydroxyde de fer et de l'hydrogène.
Le métal érodé précipite sous forme d'hydroxyde métallique en particules de quelques µm.
Les particules métalliques sont évacuées par le liquide électrolytique qui circule à grande vitesse (environ 30 m/s) sous fort débit (30 à 100 m^3/h) éliminant les calories produites par effet Joule.

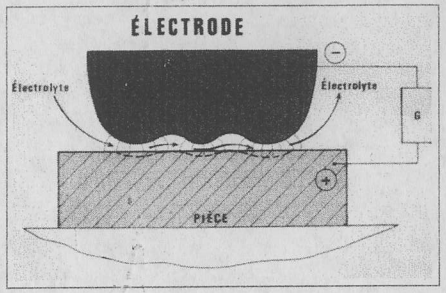


FIGURE 5.29 Schéma de principe de l'électrochimie.
Doc. Dubuis-électrochimie

Une forte pression (de 5 à 20 bars, selon les machines) est nécessaire pour obtenir la vitesse d'écoulement du fluide dans les intervalles réduits entre l'électrode-outil et la pièce (quelques dixièmes de mm).
Ces fortes pressions engendrent des forces nécessitant la rigidité du porte-pièce et du porte-outil.
L'érosion qui agit dans toutes les directions, est déterminée par la conductibilité électrique de l'électrolyte, la distance électrode-outil/pièce et la résistance de transmission métal/électrolyte.
Pas de contact électrode-outil/pièce, un gap permet le passage de l'électrolyte et élimine les courts-circuits.
La structure métallique des surfaces usinées n'est pas modifiée.

3.2 Électrolyte

Solution aqueuse d'un sel (chlorure ou nitrate de sodium) maintenue à température constante avec recyclage (filtrage).
La concentration est forte (160 g/l), pour les gros débits ; faible (50 g/l) pour les débits réduits.

Injection de l'électrolyte

Par l'électrode-outil avec évacuation entre pièce et outil, assurant le passage du courant qui crée la dissolution de matière sur la pièce cathode.
Par le bas ou un côté de l'outillage (boîte de pression) avec retour côté outil (corps d'outil) (fig. 5.30).

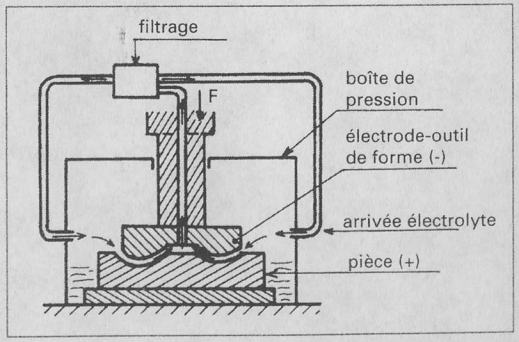


FIGURE 5.30 Schéma de circuit du liquide électrolytique injecté par l'outil.

3.3 Conditions technologiques

Ampérage. Il augmente avec l'étendue des surfaces usinées, simultanément, de 40 à 200 A/cm^2.
Tension d'usinage. Elle est de 6 à 20 volts, redressée filtrée.

3.4 Précisions obtenues

État de surface. De qualité 0,8 Ra, d'aspect poli.
Dimensions. La précision varie de 0,1 à 0,05 mm.

3.5 Matériaux usinés

Tous les métaux, quelles que soient leurs caractéristiques mécaniques, même très réfractaires.

3.6 Électrodes-outils

Généralement en cuivre et ses alliages et en acier à haute teneur en nickel.
Caractéristiques. Bonnes conductibilités électrique et thermique : point de fusion élevé.

3.7 Outillage

Spécifique pour chaque type de pièces (fig. 5.31).
Maintien pièce et électrode-outil dans une boîte de pression (de préférence, standard).

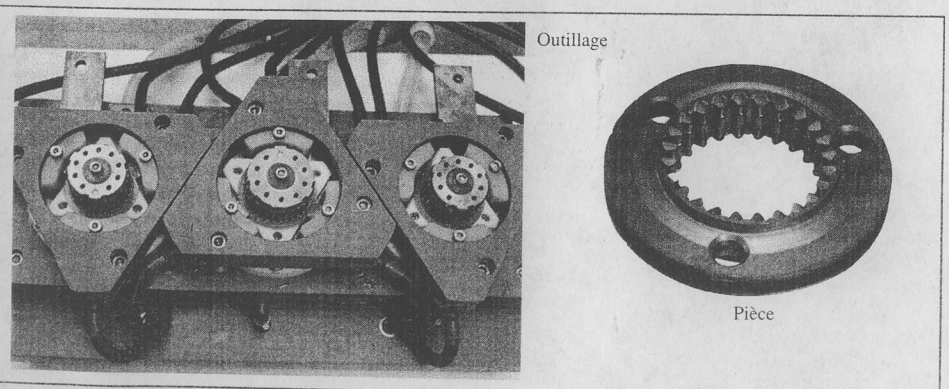


FIGURE 5.31 Outillage spécifique d'ébavurage. *Doc. Dubuis-électrochimie*

Dirige la circulation de l'électrolyte, essentiellement sur les surfaces à éroder (fig. 5.32) :
dans le sens transversal des surfaces rectangulaires ;
En périphérie des surfaces circulaires (avec évacuation au centre de l'électrode).

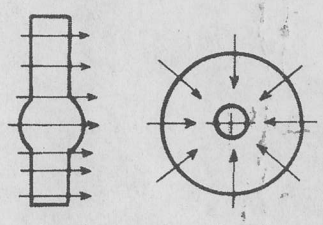


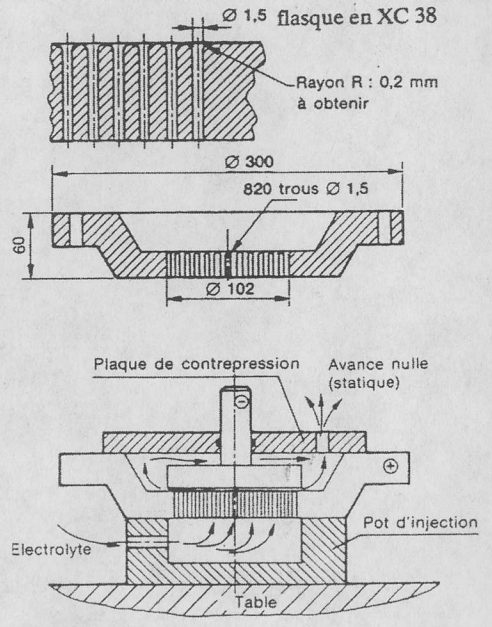
FIGURE 5.32
Circulation de l'électrolyte sur la surface des électrodes-outils.

3.8 Mise en œuvre

Deux méthodes sont employées :
usinage statique (outil sans mouvement d'avance) (fig. 5.33).
Usinage dynamique (outil recevant un mouvement d'avance) (fig. 5.30).

Électrochimie statique

Ébavurage rapide de pièces mécaniques, en qualité constante.
Avec l'outillage adapté, toutes les bavures d'une pièce sont simultanément éliminées (en quelques dizaines de secondes).



Conditions d'usinage
– Électrolyte : $NaNO_3$ - 200 g/l
– Tension d'usinage : 12 V
– Temps générateur : 30 s
– Intervalle de départ : 0,5 mm
– Intensité résultant de l'usinage : 3000 A
– Injection d'électrolyse sous la pièce plus contre-pression en sortie d'usinage

FIGURE 5.33
Usinage par électro-chimie statique.
Doc. AEG Elotherm (d'après CETIM)

Partie active de l'électrode

À situer au droit des bavures à éliminer : par effet de pointe, l'érosion s'effectue sur la bavure, progressivement (l'angle ébavuré se rayonne). L'électrolyte circulera essentiellement sur les arêtes à ébavurer (fig. 5.34).
Surfaces non fonctionnelles de l'électrode-outil à recouvrir d'un isolant.

Utilisation

Ébavurage et rayonnage d'intersections d'accès difficile sur des pièces terminées, ayant un grand nombre de bavures à éliminer ou fragiles et ne supportant pas de contraintes.

Électrochimie dynamique

Usinage par enfonçage, avec outil-électrode de forme, directement dans la masse.
Les formes intérieures profondes peuvent nécessiter un avant-trou.
Les angles vifs sont parfaitement réalisables.
Usinage d'un profil constant. Isoler latéralement l'électrode, éventuellement.
Vitesse d'avance. Elle varie de 0,5 à 12 mm/min, selon les conditions d'usinage.

Utilisation

Obtention de : formes complexes, difficiles ou impossibles à réaliser par coupe ; perçages profonds de petit diamètre ; moules ; matrices ; finition de formes forgées (fig. 5.35).
Bonne répétabilité en production de série (l'électrode-outil ne subit aucune usure).

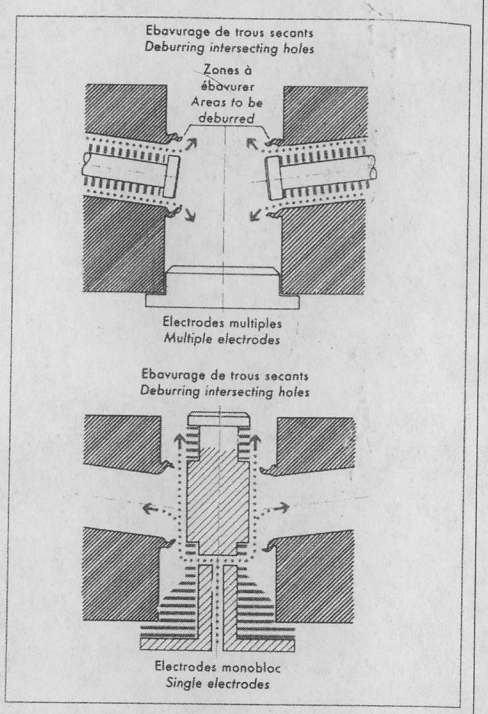
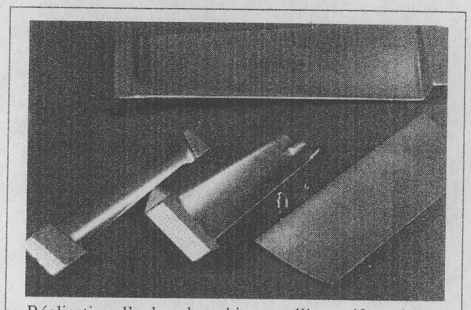


FIGURE 5.34 Schéma d'ébavurage de formes intérieures inaccessibles par coupe.
Doc. Dubuis-électrochimie



Réalisation d'aubes de turbine en alliage réfractaire

FIGURE 5.35
Exemples d'usinage électrochimique dynamique.
Doc. Dubuis-électrochimie

3.9 Sécurité

Nécessite l'aspiration des vapeurs produites.

3.10 Machines

Elles permettent l'usinage de série (petites à grandes) avec plateau porte-pièces rotatif et alimentation automatique.

4. Usinage chimique

4.1 Généralités

L'usinage chimique consiste à enlever de la matière sur des pièces métalliques par corrosion de la surface travaillée, en milieu liquide à l'aide d'un agent oxydant (acide à 80° environ).
L'érosion s'effectue lentement (quelques dixièmes de mm/heure), et simultanément sur toutes les surfaces découvertes.
Le bain doit être régénéré périodiquement.
Un rinçage est nécessaire après usinage et démasquage des surfaces protégées.
Outil. Agent oxydant chimique, ne provoque aucune contrainte mécanique, ni bavures sur les pièces usinées.

4.2 Matériaux usinés

La plupart des métaux et alliages sont usinables par ce procédé, et plus particulièrement les alliages d'aluminium.
Usinage des aciers
Le bain est constitué de trois acides (chlorhydrique, nitrique et phosphorique servant de mouillant).

4.3 Mise en œuvre

Comme pour tous traitements de surface, la pièce à éroder subira les opérations préliminaires de dégraissage, rinçage, séchage.

Préparation des surfaces

Les surfaces ne devant pas être érodées seront protégées par masquage (fig. 5.36).
Après recouvrement total de la pièce au néoprène (par immersion et séchage à l'air ambiant) les surfaces à attaquer sont découvertes (gabarits) avec un sous-dimensionnement correspondant à la profondeur d'usinage.

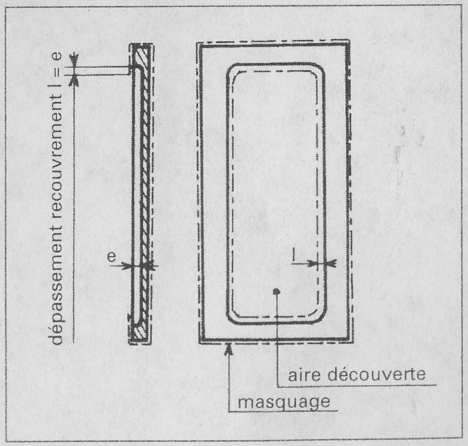


FIGURE 5.36 Évidement obtenu dans une pièce par usinage chimique (pièce non démasquée).

5

4.4 Utilisation

Usinage de surfaces aux profils divers et peu profondes sur des pièces minces, déformables, ne pouvant pas être maintenues sur table (fig. 5.37).
Les pièces usinées peuvent être de petites à grandes dimensions, en fonction de la capacité du bac d'immersion.

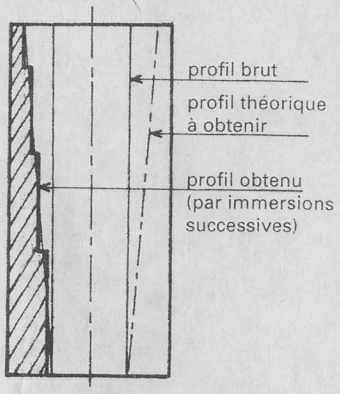


FIGURE 5.37 Allégement progressif sur deux faces d'une pièce (par usinage chimique).

4.5 Sécurité

Ne pas aspirer les vapeurs dégagées qui sont toxiques.

6 PROCÉDÉS DE FILETAGE

1. Généralités 165
   1.1 Différents procédés de filetage 165
   1.2 Différentes formes de filets 165
   1.3 Tolérances de fabrication des filetages triangulaires 168
2. Filetage en multipasses 168
   2.1 Généralités 168
   2.2 Mouvements générateurs 168
   2.3 Outils de filetage 169
   2.4 Conditions de coupe 171
   2.5 Mise en œuvre 171
   2.6 Utilisation 172
3. Filetage en monopasse 172
   3.1 Généralités 172
   3.2 Mouvements générateurs 173
   3.3 Outils de filetage 173
   3.4 Conditions de coupe 174
   3.5 Mise en œuvre 174
   3.6 Utilisation 175
4. Filetage d'intérieur avec outil de taraudage 175
   4.1 Généralités 175
   4.2 Mouvements générateurs 176
   4.3 Outils de taraudage 176
   4.4 Conditions de coupe 178
   4.5 Mise en œuvre 178
   4.6 Appareillages. Pour taraudage à avance libre 181
   4.7 Utilisation 182

5. Filetage d'extérieur avec outil filière 182
5.1 Généralités 182
5.2 Mouvements générateurs 182
5.3 Outils de filetage 183
5.4 Conditions de coupe 183
5.5 Utilisation 184
6. Filetage d'extérieur par formage à froid 184
6.1 Principe 184
6.2 Effort de formage 186
6.3 Outils-molettes 187
6.4 Matériaux à fileter 187
6.5 Mise en œuvre 187
6.6 Machines 188
6.7 Utilisation 189
7. Filetage d'extérieur à l'outil-meule 190
7.1 Généralités 190
7.2 Outil 190
7.3 Machine et utilisation 190
8. Filetage par tourbillonnage 191
8.1 Généralités 191
8.2 Outils de coupe 191
8.3 Machine et utilisation 191

1. Généralités

Réalisation des filets, en intérieur et en extérieur selon les procédés, sur des formes généralement cylindriques (trous, alésages, cylindres) à l'aide d'outils de forme.
Les machines utilisées sont spécifiques ou de production des formes initiales (tours, fraiseuses, perceuses...).
Selon la précision à obtenir, les dimensions (diamètre et longueur du filetage), la production à assurer, le type de pièces produites avec filetage, les procédés de mise en œuvre seront différents.

1.1 Différents procédés de filetage

Filetage par coupe

En multipasses, avec outils de tournage à un bec

Sur machines de tournage (tours, centres de tournage), en extérieur et intérieur.

En monopasse, avec outils de fraisage (les fraises à fileter)

Sur machines effectuant du fraisage (fraiseuses, centres d'usinage, centres de tournage), en extérieur et intérieur.

En monopasse, avec des outils multi-arêtes (les tarauds)

Sur machines d'usinage (perceuses, tours, fraiseuses...) en intérieur.

En monopasse, avec des outils multi-arêtes (les filières)

Sur tours et machines spécifiques.

Filetage par formage

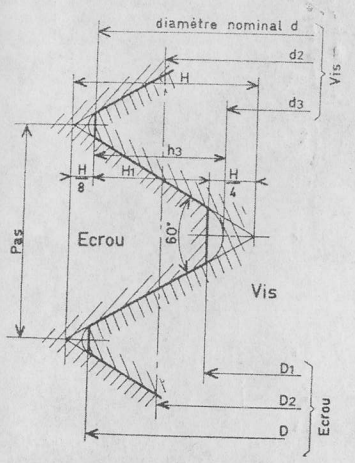
Avec des outils circulaires (les molettes) sur machines spécifiques ou sur tours avec appareillage porte-molettes.

1.2 Différentes formes de filets

Normalisés en profil (triangulaire, trapézoïdal, Whitvorth, rond...) et en pas (à un ou plusieurs filets) répondant à des utilisations spécifiques d'assemblage non permanents, soit principalement:

Filetage métrique

(NF E 03.001- IS0 68), le plus courant: le profil est triangulaire, avec différents pas correspondant aux diamètres (l'angle d'hélice du filet est d'environ 2° pour l'ensemble des diamètres (fig. 6.1 et 6.2).



Diamètre nominal : d = D

Hauteur théorique du filet :

$$H = p\frac{\sqrt{3}}{2} = 0{,}866\ P$$

Hauteur du filet en contact :

$$H_1 = \frac{D - D1}{2} = 0{,}541\ P$$

Hauteur du filet de la vis :

$$H_3 = \frac{d - dz}{2} = 0{,}613\ P$$

Diamètre moyen sur flanc :

$$d_2 = D_2 = d - \frac{3H}{4} = d - 0{,}65\ P$$

Diamètre intérieur de taraudage : (écrou)

$$D_1 = d - 2H_1 = d - 1{,}082\ P$$

Diamètre du noyau de la vis (fond de filet) :

$$d_3 = d - 2h_3 = d - 1{,}226\ P$$

Rayon fond de filet : 0,144 P ; Rayon fond d'écrou : 0,072 P

FIGURE 6.1 Filet triangulaire, profil ISO. *d'après Norbert et Philippe*

Diamètre nominal (mm)	Pas gros (mm)	Pas fins (mm)
3	0,5	/
4	0,7	/
5	0,8	/
6	1	/
8	1,25	1
10	1,5	1,25-0,75
12	1,75	1,25-1
14-16	2	1,5-1
18-20-22	2,5	1,5-1
24-27	3	2-1,5
30-33	3,5	2-1,5
36-39	4	3-1,5
42-45	4,5	3-1,5
48-52	5	3-1,5
56-60	5,5	4-2
64-68	6	4-2
72 à 150	6-4-2	

FIGURE 6.2 Diamètres et pas ISO, filet triangulaire.

Filetage trapézoïdal symétrique

(NF E 03.615 à 617), pour des utilisations sous fortes charges.
Le diamètre nominal est choisi dans la série des diamètres IS0 (fig. 6.3).
Le pas choisi est le plus grand pas compatible avec les conditions d'emploi et un maximum de ,25 mm de diamètre.

Filetage rond pour vis à billes

(NF E 22.201, IS0 3408 / DIN 69.051) pour utilisation de grande précision et excellent rende-ment, en réalisation roulée ou rectifiée (fig. 6.4).

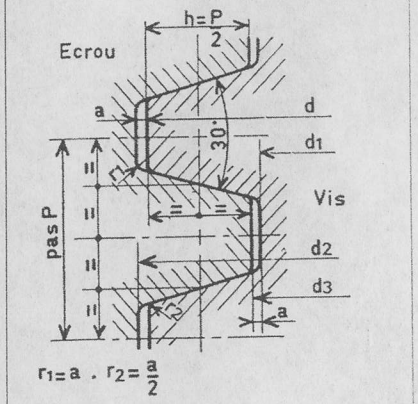


FIGURE 6.3 Filet trapézoïdal symétrique. *Doc. Norbert et Philippe*

Diamètre nominal (mm)	Pas (mm)	Longueur maxi (mm)
8	2,5	3500
12	5	3500
16	5	3500
16	16	3500
20	5	3500
20	20	3500
25	5	5000
25	25	5000
32	5	5000
32	32	5000
40	5	5000
40	40	5000
50	5	5900
50	40	5900
63	10	5900
63	40	5900
80	10	5900
80	20	5900

FIGURE 6.4 Dimensions des vis à billes roulées.

Autres filetages normalisés

Pour des utilisations spécifiques, soit :
Filetages pour tuyauterie dite « gaz » avec étanchéité (NF E 03.004). et sans étanchéité (NF E 03.005) (fig. 6.5).
Filetages à filet rond pour SNCF (NF E 00.016 à 032) (fig. 6.6).
Filetages trapézoïdaux asymétriques pour artillerie (NF E 03.611).
Filetages pour raccords de canalisations électriques (NF C 68.190, C 63.021 à 022).
Filetages pour raccords de valves pneumatiques (NF E 87.012).
Filetages pour cônes d'assemblage des robinets de bouteilles de gaz (NF E 29.671 à 684) et pour raccords de sortie de gaz (NF E 29.652 à 660).
Filetage miniature ISO pour micromécanique (NF E 03.501 à 504).

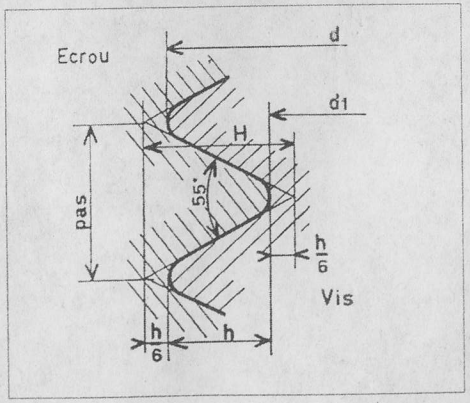


FIGURE 6.5 Filet gaz. *Doc. Norbert et Philippe*

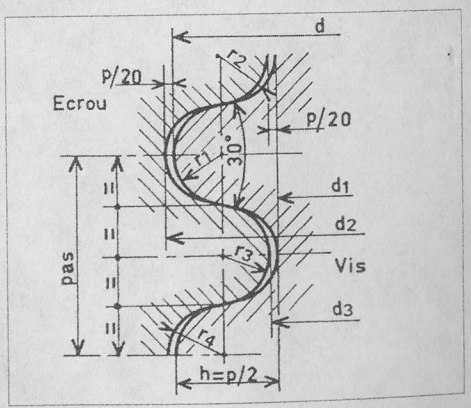


FIGURE 6.6 Filet rond. *Doc. Norbert et Philippe*

1.3 Tolérances de fabrication des filetages triangulaires

Elles sont établies analogiquement au système de tolérances de l'alésage normal.
Le profil théorique est celui défini par le profil normalisé et réalisé à la cote nominale de tolérance 0.

La vis

Filetage d'extérieur : est au diamètre extérieur h 13 et l'intervalle de tolérance est au négatif (h^{0}_{-IT}).

L'écrou

Filetage d'intérieur : est au diamètre d'alésage H 15 et l'intervalle de tolérance est au positif (h_{0}^{+IT}).

Flancs du filet

Les tolérances de réalisation sur flancs du filet sont dans les qualités 6 à 8 (h6 à h8 et H6 à H8) du diamètre nominal.

2. Filetage en multipasses

2.1 Généralités

Procédé de tournage, où l'outil effectue des passes successives répétées automatiquement sur tours à CN et centres de tournage.

2.2 Mouvements générateurs

L'outil reçoit le mouvement d'avance et la pièce le mouvement de coupe (fig. 6.7).
Cycles fixes de filetage : à pas constant, intégrés dans les CN, avec des menus pour réalisation de filetages divers (cylindrique, conique, transversal, enchaîné, à plusieurs filets) (fig. 6.8).
Les passes successives sont à section constante.
La pénétration d'outil peut être à droite ou oblique.

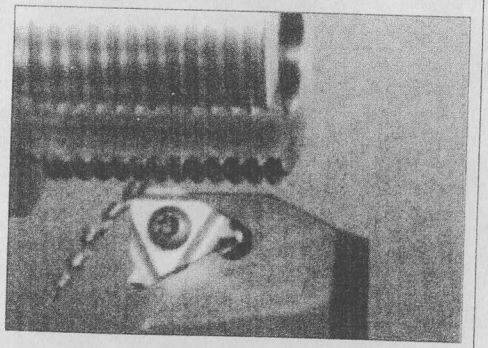
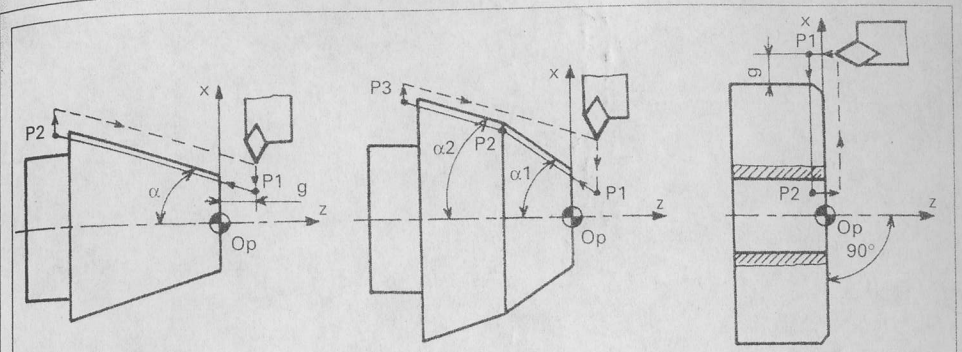


FIGURE 6.7
Opération de filetage en multipasses.
Doc. Vardex



a- filetage conique b- filetage enchaîné c- filetage tranversal

FIGURE 6.8 Cycles de filetage sur MOCN.

Cycle de filetage cylindrique

Réalisation des filets en un nombre de passes à préciser, la CN déterminant la profondeur de chaque passe (pour les pas normalisés).
Nombre de passes. On admet :
de 5 à 7 pas à produire pour les aciers et bronze dur ;
de 2 à 3 pas à produire pour les fontes et les alliages d'aluminium et de cuivre.

Cycle de filetage conique

Identique au filetage cylindrique, en précisant le demi-angle du cône.

Cycle de filetage transversal

Identique au filetage cylindrique en programmant un angle de 90°.

Cycle de filetage enchaîné

Réalisation simultanée de filetages – de même pas – sur deux cônes successifs.

Nota
Sur tour mécanique, le filetage cylindrique est semi-automatique, seul les mouvements de coupe et d'avance sont donnés par la machine (liaison rotation broche porte-pièce avec vis-mère guide d'outil).

2.3 Outils de filetage

Ils sont constitués d'un corps porte-plaquette et d'une plaquette de forme.
Plaquettes de filetage. En carbure généralement revêtu ; elles sont fixées mécaniquement sur le porte-plaquette, avec précision de positionnement (remplacement facile).
Jusqu'à un angle d'hélice du filet de deux degrés (profil ISO), les plaquettes de filetage, non dépouillées, s'utilisent sur porte-plaquette standard.

Plaquettes pour filetages ISO

Elles sont de deux types de profils, soit :

À profil plein

Usinent le filet et son sommet, permettant l'arrasage au diamètre nominal (facilite le contrôle de l'opération).
Chaque plaquette correspond à un pas déterminé (fig. 6.9).

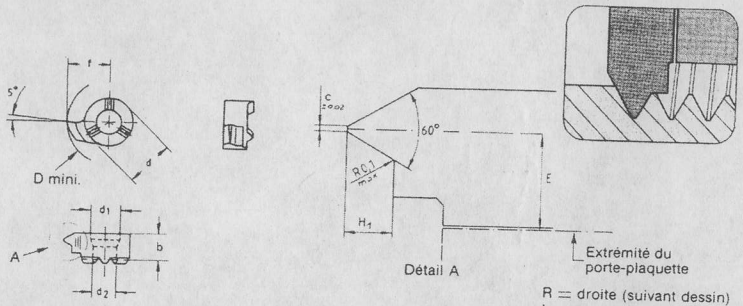


FIGURE 6.9 Plaquette indexée de filetage à profil plein. *Doc. Stellram*

À profil partiel

Usinent le filet et non le sommet.
Une plaquette d'un profil donné réalise les filetages de pas différents.
Ces plaquettes sont conçues pour des plages de pas (fig. 6.10).

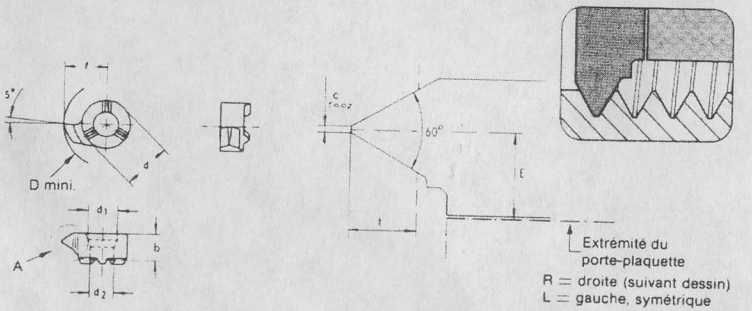
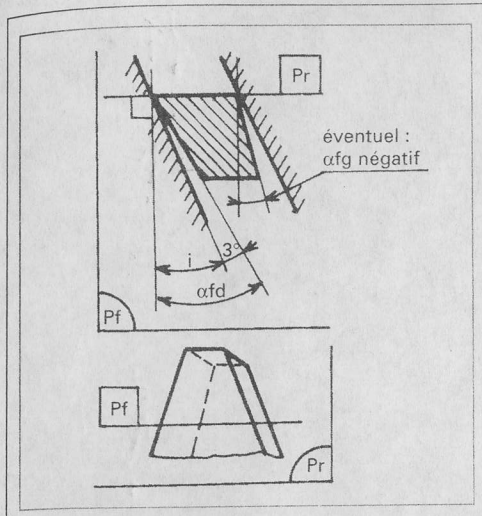


FIGURE 6.10 Plaquette indexée de filetage à profil partiel. *Doc. Stellram*

Filetage à grand pas

L'angle d'hélice est à déterminer afin d'incliner l'outil (ou l'affûter), pour obtenir un angle de dépouille évitant le talonnage sur le flanc qui attaque le filet (fig. 6.11).



On détermine :
L'angle d'hélice du filet *i*, soit :
tg *i* = pas du filet *p* / diamètre sur flanc d_2.
L'angle de dépouille α_f dans le plan d'avance Pf, soit :
$\alpha_f = i + 3°$ pour le flanc attaquant le filet.
Si nécessaire, l'angle de dépouille orthogonale α_0, soit :

$$\text{tg } \alpha_0 = \text{tg } \alpha_f \cdot \cos\varphi,$$

avec φ = demi-angle au sommet du filet.

FIGURE 6.11
Dépouilles latérales d'outil de filetage à grand pas.

2.4 Conditions de coupe

Vitesses de coupe

Relativement identiques aux différentes opérations de tournage : Selon les matériaux usinés, de 50 à 500 m/min pour les outils en carbure et de 5 à 80 m/min pour les outils en acier rapide (fig. 6.12).

Nota : En utilisation semi-automatique sur tour mécanique, la vitesse de coupe est de quelques m/min, (dégagement de l'outil en fin de passe).

Matière	Carbure		ARS
	Vi (m/min)	Nuance	Vi (m/min)
Acier 40 à 70	150-200	P10	20 à 50
Acier 70 à 90	100-150	P20	20 à 40
Acier Rr > 90	70 à 100	M20	15 à 30
Acier inoxydable	50 à 70	P40	5 à 10
Fonte HB ⩽ 250	80 à 140	K10	20 à 40
Fonte HB > 250	50 à 80	K10	5 à 30
Bronze – Laiton	200 à 300	K10	30 à 50
Bronze-Aluminium	80 à 120	K10	20 à 40
Alliages d'aluminium	300 à 500	K10	60 à 80

FIGURE 6.12 Vitesses de coupe conseillées en filetage multipasses.

Vitesses d'avance

Elles correspondent aux pas à obtenir.

2.5 Mise en œuvre

L'ébauche, cylindrique ou alésage, sera usinée dans les tolérances d'obtention des filetages, selon les diamètres nominaux.
L'entrée de filet est généralement effectuée par un chanfrein (du demi-angle de sommet de filet).

La sortie ou tombée de filet, peut être effectuée par une gorge (profondeur du fond de filet) à réaliser avant le filetage (fig. 6.13).

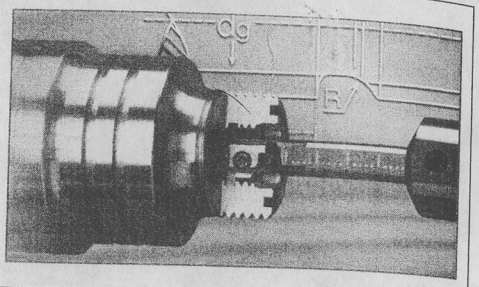


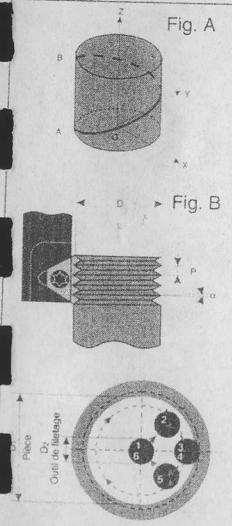
FIGURE 6.13
Opération de fonçage de gorge de sortie de filet.
Doc. Vardex

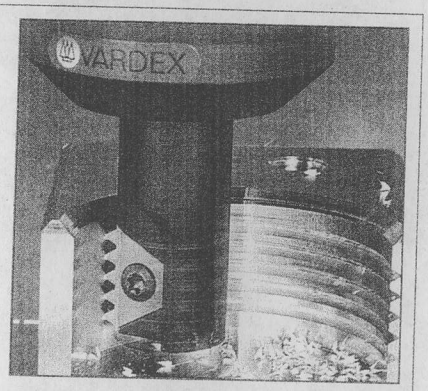
2.6 Utilisation

En tournage de pièces cylindriques, systématiquement (suppression d'une phase de filetage) sur machine spécifique, sauf si le cahier des charges stipule un autre procédé (formage...).

3. Filetage en monopasse

3.1 Généralités





Fraisage de filetages intérieurs le long d'un arc tangentiel
1-2 Approche rapide
2-3 Entrée de l'outil le long d'un arc tangentiel avec avance simultanée le long de l'axe Z
3-4 Mouvement hélicoïdal pendant une orbite complète
4-5 Orbite de l'outil pendant l'arc tangentiel avec la poursuite de l'avance de l'axe Z
5-6 Retour rapide

Procédé de fraisage avec des outils mono ou multi-arêtes de coupe, en interpolation hélicoïdale sur machines à commande numérique (fraiseuses, aléseuses, centres d'usinage) (fig. 6.14).

FIGURE 6.14
Filetage à la fraise multidents.
Doc. Vardex

3.2 Mouvements générateurs

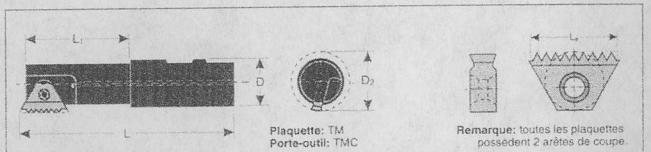
Obtenus par un cycle fixe intégré dans les CN.
L'outil reçoit le mouvement de coupe (rotation autour de l'axe du porte-outil), et le mouvement d'avance hélicoïdal (circulaire dans le plan XY, et linéaire simultané suivant Z), enveloppant la forme à fileter (cylindre ou alésage).
L'approche et la sortie tangentielles de l'outil sont intégrées dans le cycle de fraisage des filets.

3.3 Outils de filetage

Ils sont constitués d'un corps cylindrique porte-plaquette et d'une plaquette de forme.
Les plaquettes sont indexées avec précision dans leur porte-outil, permettant leur changement rapide et précis.
Elles sont triangulaires et de deux types : monodents et multidents, aux profils adaptés aux différents filetages à obtenir (courts ou longs, à pas fin, normal ou grand).

Plaquettes multidents

Elles sont réversibles, possédant deux faces de coupe (fig. 6.15).



Plaquette IC	Dimensions (mm) L	L_1	D	D_2	Gamme de pas pour la norme ISO	UN	W	PG	Longueur L_e (mm)
1/4"	70-85	12.0-20.0	12-20	11.5	0.5-1.5	32-14	28-14	20-16	10
3/8"	90-95	22.0-43.0	16-20	17-20	0.5-2.0	32-11.5	26-11	20-16	15
5/8"	110-120	52.0-58.0	25-32	30-37	1.0-4.5	24-6	16-6	16	25

FIGURE 6.15
Plaquettes multi-arêtes et porte-outil.
Doc. Vardex

Plaquettes monodents

Elles ont trois positions d'indexage (forme triangulaire) (fig. 6.16).

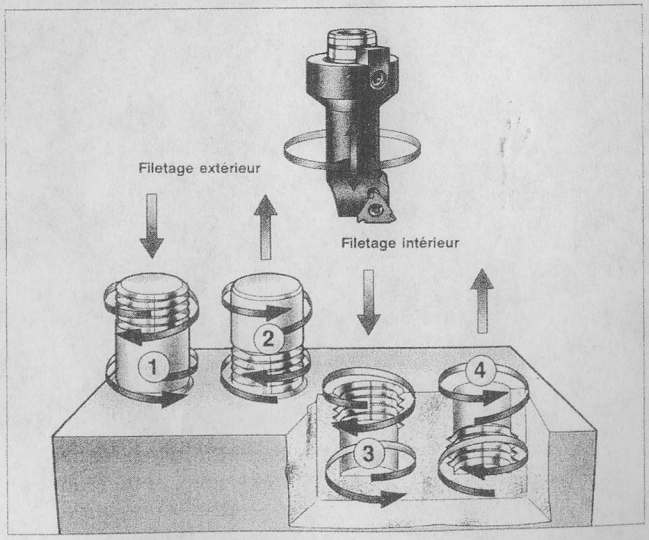


FIGURE 6.16
Filetage à la fraise monodent.
Doc. Sandvik Coromant

3.4 Conditions de coupe

Vitesses de coupe

Elles sont élevées, les plaquettes étant en carbure revêtu : de 80 à 1 500 m/min, selon les matériaux usinés (fig. 6.17).

Matière de la pièce	Vitesse de coupe recommandée m/min			
	VSX (ISO P10-P30)	V30 (ISO P20-P30)	VKX (ISO K05-K20)	VK2 (ISO K10-K20)
Acier au carbone < 600 N/mm²	160 - 240	160 - 200	150 - 250	-
Acier au carbone 600 - 800 N/mm²	170 - 200	150 -180	170 - 200	-
Acier allié 700 - 800 N/mm²	120 - 170	110 - 150	120 - 180	-
Acier allié 850 - 1100 N/mm²	110 - 150	100 - 130	110 - 150	-
Acier inoxydable (austénitique < 700 N/mm²)	160 - 200	150 - 180	160 - 200	-
Acier inoxydable (martensitique < 1100 N/mm²)	150 - 180	140 - 170	150 - 200	-
Acier inoxydable (ferritique < 800 N/mm²)	150 - 200	140 - 170	150 - 200	-
Fonte d'acier < 500 N/mm²	710 - 200	150 - 180	710 - 200	-
Fonte d'acier 700 - 1000 N/mm²	120 - 180	120 - 150	120 - 180	-
Fonte malléable 150 - 240 HB	-	-	-	100 - 130
Fonte 100 - 200 HB	-	-	110 - 150	110 - 150
Bronze / Copper	-	-	120 - 180	120 - 170
Aluminium	-	-	200 - 400	660 - 980
VSX et VKX sont recouverts de TiN PVD	L'avance recommandée par arête de coupe et par rotation se situe entre 0,05 mm et 0,3 mm.			

FIGURE 6.17
Vitesses de coupe recommandées pour fraises à fileter multidents (carbure revêtu).
Doc. Vardex

Vitesses d'avance (suivant l'hélice)

Elles varient de 0,05 à 0,3 mm/tour, selon les matériaux et les pas (dimensions des plaquettes).
La vitesse d'avance d'interpolation, au centre de l'outil, se détermine par :

$$V_{fi} = V_f \sqrt{\frac{D + D_0}{D}}$$ pour les cylindres,

et $$V_{fi} = V_f \sqrt{\frac{D - D_0}{D}}$$ pour les alésages

avec $V_f = f.$ n tr/min. (fig. 6.18).

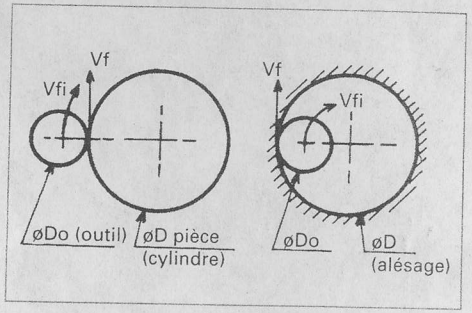


FIGURE 6.18 Détermination de la vitesse d'avance pour filetage à la fraise.
D'après Doc. Sandvick Coramant

Puissance de coupe

Elle est faible : production de mini-copeaux et évacuation facile.

3.5 Mise en œuvre

Le filetage s'effectue en une seule passe (fraisage en opposition ou en concordance) en extérieur ou en intérieur dans tous diamètres, aux pas à droite ou à gauche (avec une même plaquette, dans une plage donnée de diamètres).

Une gorge de dégagement du filet n'est pas nécessaire, la coupe ne produisant pas de bavure appréciable.

3.6 Utilisation

Essentiellement sur machines à commande numérique de fraisage-alésage en filetage cylindrique ou conique, systématiquement sur les pièces de type prismatique, directement dans la phase d'usinage (comme toutes les autres opérations de fraisage).
L'état de surface et la concentricité des filetages obtenus sont excellents.
Nota : Des filetages d'extérieur pourront être réalisés sur tour ou machine spécifique, avec un appareillage motorisant (mouvement de coupe) une fraise type trois tailles du profil à obtenir.
La fraise est inclinée de l'angle d'hélice du filet (fig. 6.19).

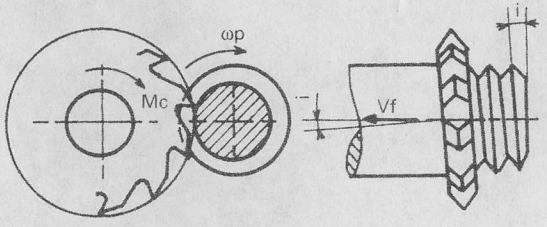


FIGURE 6.19
Schéma de filetage à la fraise à fileter type 3 tailles.

4. Filetage d'intérieur avec outil de taraudage

4.1 Généralités

Le taraudage s'effectue avec des outils de forme – les tarauds – en une passe, par le vissage de l'outil dans un trou préalablement réalisé à un diamètre voisin du diamètre intérieur de l'écrou D2, réalisant le filetage intérieur correspondant à celui de l'outil (fig. 6.20).
Le dévissage s'effectue par inversion du sens de rotation de l'outil.

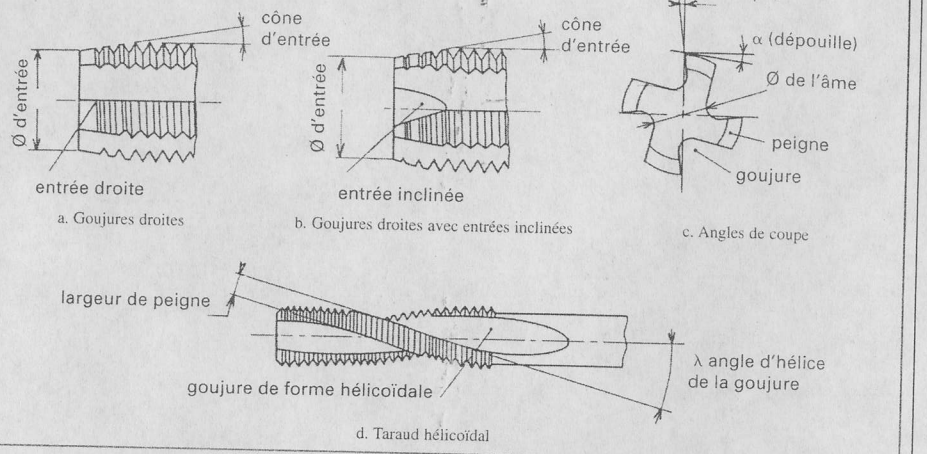


FIGURE 6.20 Outil-taraud.

Doc. Leclerc

4.2 Mouvements générateurs

Le mouvement de coupe est la rotation donnée à l'outil.

Le mouvement d'avance correspond au pas par tour d'outil. L'avance est :

libre, le taraud avance à son pas : taraudage en général ;

guidée, par la commande numérique : taraudage à pas très précis.

Cycle fixe de taraudage

Intégré dans les CN, il permet une programmation simplifiée (définition de la profondeur de taraudage) (fig. 6.21).

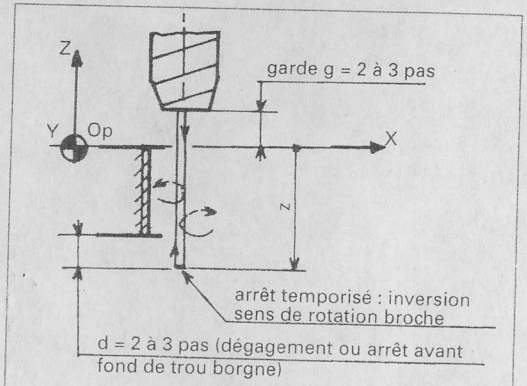
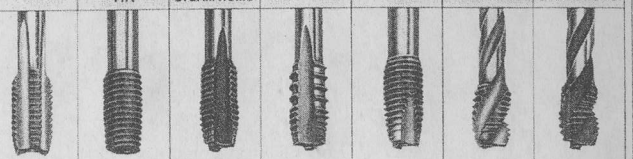
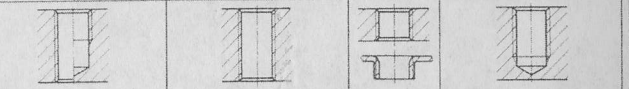


FIGURE 6.21 Cycle fixe de taraudage en CN.

4.3 Outils de taraudage

Les tarauds, outils de forme normalisés NF E 66-103 à 120, ont une entrée conique facilitant leur positionnement dans le trou à l'attaque et assurant la coupe progressive de l'outil avec répartition des efforts sur un plus grand nombre de dents (fig. 6.22).

Le cône d'entrée des tarauds-machine est généralement court : cinq pas pour trous débouchants ; deux à trois pas pour trous borgnes.

NUANCE ACIER	HSS-E5	HSS-2E	HSS-2E	HSS-2E	HSS-2E	HSS-2E	HSS-2E
REVÊTEMENT DE SURFACE		TIN	STEAM HOMO			TIN	STEAM HOMO
TYPE DE TARAUD RECOMMANDÉ							
FORME DE L'ENTRÉE	C	C	B	B	B	C	C
GÉOMÉTRIE DU TROU							
VITESSE DE COUPE M/MIN.	10-18	20-30	10-18	10-18	10-18	8-12	8-12

* LUBRIFIANT : O : HUILE DE COUPE E : ÉMULSION

FIGURE 6.22 Différents types de tarauds selon utilisation.

Doc. Perfor

Diamètres des tarauds-machine

De M 1 à M 64, les utilisations courantes étant des diamètres 3 à 24, pour tous types de filetages.

Goujures des tarauds

Des goujures droites ou hélicoïdales sur le filetage du taraud, constituant la denture avec les arêtes de coupe.

Le sens de l'hélice. Les goujures donnent l'inclinaison d'arête aux dents et dirigent les copeaux.

Goujures hélicoïdales à droite

Avec hélice généralement de 35 à 45° : provoquent le dégagement des copeaux à l'arrière du taraud (évite le bourrage en fond de trou).

Goujures droites avec entrée suivant hélice à gauche (coupe GUN) ou hélice gauche :

provoquent le dégagement des copeaux à l'avant du taraud.

Goujures droites

Les copeaux ne sont pas dirigés : leur évacuation s'effectue par gravité (lubrification, soufflage) (fig. 6.23).

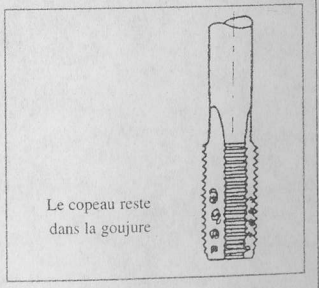


FIGURE 6.23 Taraud à goujures droites

Doc. Leclerc

Affûtage

Les tarauds sont affûtables dans les goujures (faces d'attaque d'outil de forme).

Des centres ou des pointes coniques (petits diamètres) permettent leur maintien sur affûteuse.

Denture

Continue ou alternée, elle est à adapter aux travaux à effectuer (matériaux à usiner, trous débouchants ou borgnes).
Elle comporte une dépouille (surfaces en dépouille détalonnées par rectification).

Matériaux

Généralement en acier rapide revêtu TIN (diminue l'effort de coupe et l'usure, assure une bonne résistance à l'abrasion, augmentant la durée de vie d'outil).

4.4 Conditions de coupe

Vitesses de coupe

Elles sont peu élevées (fragilité d'outil et difficulté d'évacuation des copeaux):
de 2 à 30 m/min selon les matériaux, le pas à obtenir, le diamètre des tarauds, le type de trous (borgne ou débouchant), et les relatives grandes avances (fig. 6.24).

Vitesse d'avance (par tour)

Elle correspond au pas de l'outil.

Vitesses de coupe en taraudage en m/min		
Aciers	$R \leq 50$ daN/mm²	10 à 18
	$50 > R < 70$ daN/mm²	8 à 15
	$70 > R < 90$ daN/mm²	5 à 10
	> 90 daN/mm²	3 à 6
	au nickel, cobalt	2 à 4
Fontes	malléables, HB > 250	6 à 12
	dure, HB ⩾ 250	3 à 6
Bronze		6 à 15
Laitons		15 à 22
Cuivre		12 à 25
Alliages	d'aluminium (1)	15 à 30
	d'aluminium (2)	10 à 25
Alliages de zinc (zamack)		10 à 18
Titane		2 à 5
Plastiques	durs	3 à 8
	tendres	12 à 20

(1) copeaux courts (2) copeaux longs
Taraudage par déformation: doubler la V_c.

FIGURE 6.24
Vitesses de coupe recommandées en taraudage (tarauds en ARS revêtu).

4.5 Mise en œuvre

Diamètres de perçage (avant taraudage, D1)

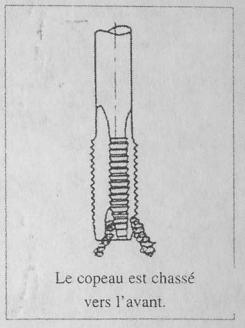
Défini par: diamètre nominal du filetage D– 2 hauteurs de filet
Pratiquement, on admet:
Pour les petits diamètres (Ø <10 mm) dans tous matériaux, DI = D – pas.
Au-delà de 10 mm:
D1 = D (1,06 · pas) pour: aciers de $R \leq 60$ daN/mm², alliages d'aluminium et laiton.
DI = D- (1,10 · pas) pour: aciers de $R \leq 80$ daN/mm², fontes, bronze.

DI = D - (1,20 · pas) pour: aciers de $R > 80$ daN/mm² et matériaux durs.
Matériaux très durs (aciers au nickel-cobalt...) prendre si possible: DI = D-– (1,30 · pas).
Trous borgnes. Profondeur de perçage de l'avant-trou: longueur du taraudage + 3 à 4 pas.

Tarauds à goujures droites, coupe GUN

Pour trous débouchants profonds, dans tous les aciers (de construction, à outils, inoxydables) les alliages de cuivre, les matériaux à copeaux longs, les fontes malléables (≤ 160 HB) les matériaux durs (titane et ses alliages...) (fig. 6.25).

FIGURE 6.25
Taraud à goujures droites, coupe GUN.
Doc. Leclerc

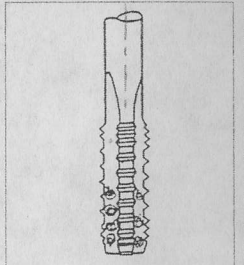


Le copeau est chassé vers l'avant.

Tarauds à goujures droites et filets alternés

Pour trous profonds borgnes et débouchants, dans tous matériaux: aciers jusqu'à 90 daN/mm², alliage d'aluminium et de cuivre, les matériaux à copeaux longs (fig. 6.26).

FIGURE 6.26
Taraud à goujures droites, et filets alternés.
Doc. Leclerc



Le copeau reste dans la goujure.

Tarauds à goujures hélicoïdales, hélice à 35° à droite

Pour trous borgnes peu profonds dans les fontes, les aciers et les alliages de cuivre.

Tarauds à goujures hélicoïdales, hélice à 45° à droite

Pour trous borgnes profonds, dans tous matériaux (fig. 6.27).
Tarauds à faible hélice à gauche: éventuellement, pour gros filets (fig. 6.28).

FIGURE 6.27
Taraud à goujures hélicoïdales à droite.
Doc. Leclerc

Le copeau remonte dans la goujure.

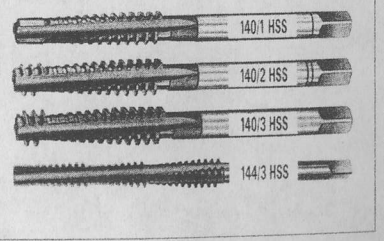


FIGURE 6.28 Tarauds pour filets trapézoïdaux.
Doc. Manigley

Tarauds à coupe cuillère

Pour trous débouchants de faible profondeur (tôles...) et de petits diamètres (jusqu'à Ø12 mm environ) dans les aciers jusqu'à 90 daN/mm^2, éventuellement dans tous matériaux (fig. 6.29).

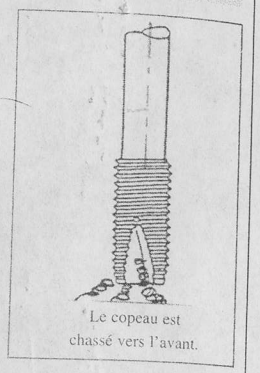


FIGURE 6.29
Taraud à coupe cuillère.
Doc. Leclerc

Tarauds à refouler

De section polygonale, sans goujure (fig. 6.30) : pour trous borgnes et débouchants dans les matériaux ductiles.
Le taraud, soumis à une pression axiale qui fait fluer le métal dans ses formes en creux de l'entrée conique formant le relief du filet, calibre ensuite le filetage en se vissant.
Les filets sont écrouis et plus résistants (voir filetage par formage).
Le sommet des filets présente une zone fissurée, pouvant être contre-indiquée (alimentaire, médical...).
Le taraudage, à effectuer sous lubrification évitant le grippage, produit un excellent état de surface.
Il est recommandable dans l'aluminium à copeaux longs.

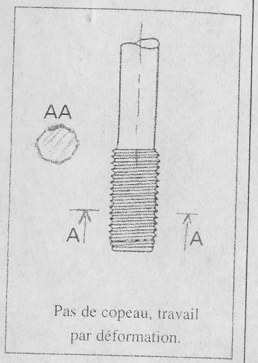


FIGURE 6.30 Taraud à refouler, sans goujures.
Doc. Leclerc

Vitesses de coupe

Double du taraudage par coupe (pas d'évacuation de copeaux).
Métaux non ferreux (alliages de cuivre, d'aluminium à copeaux longs, de zinc) : de 20 à 30 m/min.
Aciers non alliés et inoxydables : de 6 à 12 m/min.

Diamètre de perçage de l'avant-trou

Il doit être précis, soit : diamètre nominal – (pas du filet/2 ± pas/30).
Un chanfrein d'entrée évite la formation d'un bourrelet sur la face d'entrée.

Taraud d'enfilade

À longue queue de diamètre inférieur au diamètre de perçage et goujures droites ou à coupe GUN (fig. 6.31).
Taraudage en continu de petites pièces courtes et débouchantes (écrous), avec appareillage spécifique (le taraud est autocentré par les pièces qui défilent dans un guide).
Diamètres courants des tarauds : de 3 à 24 mm, pour des longueurs de 90 à 250 mm.

FIGURE 6.31
Taraud long d'enfilade.
Doc. Leclerc

Taraudage manuel

Usinage progressif des filets avec des tarauds à goujures droites, en jeu de deux ou trois : ébaucheur (6 pas d'entrée conique) ; finisseur (2 pas d'entrée) ; éventuellement taraud intermédiaire.
Pour tous matériaux, toutes profondeurs des trous borgnes et débouchants (fig. 6.32).

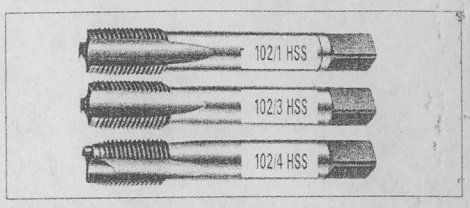


FIGURE 6.32 Jeu de tarauds-main. *Doc. Manigley*

Grande précision du pas de filetage

Obtenue, selon les machines, par la CN ou par guidage avec une vis-patronne, le taraud étant monté rigide dans la broche porte-outil.

Taraudage à vitesse différentielle

Taraudage en bout dans l'axe de pièce :
avec motorisation du taraud par vissage et dévissage à vitesse différentielle, sans modification de la vitesse de coupe du ou des outils usinant simultanément (fig. 6.33).

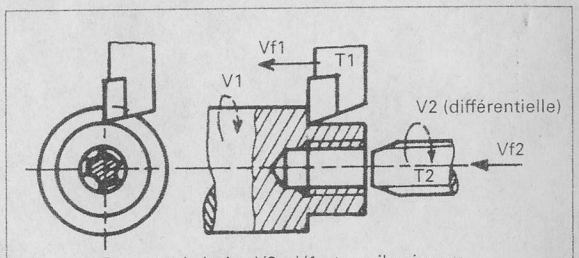


FIGURE 6.33
Schéma de taraudage à vitesse différentielle.

6

4.6 Appareillages. Pour taraudage à avance libre

Mandrins porte-taraud :
Assurent une liberté axiale à l'outil, pour sa non-rupture, à l'inversion de sens (fig. 6.34 et 6.35).

Nota : Des appareillages de taraudage assurent l'inversion automatique de sens de rotation de l'outil : pour équi-

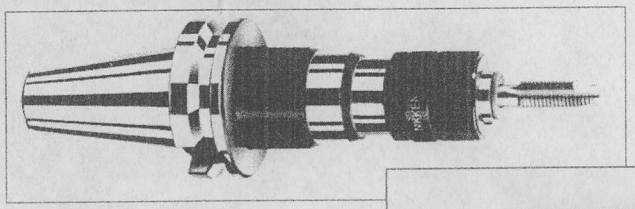


FIGURE 6.34 Appareil à tarauder, type outil flottant.
Doc. Nikken

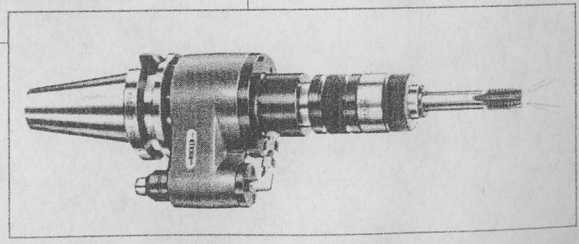


FIGURE 6.35
Appareil à tarauder, avec trou d'arrosage.
Doc. Nikken

4.7 Utilisation

Obtention rapide de filetages d'intérieur, en particulier dans les petits diamètres (de 3 à 24 mm), systématiquement sur MOCN (en particulier : perceuses, fraiseuses, centres d'usinage) par inversion automatique du sens de rotation de la broche porte-outil (vissage et dévissage du taraud) (fig. 6.36).

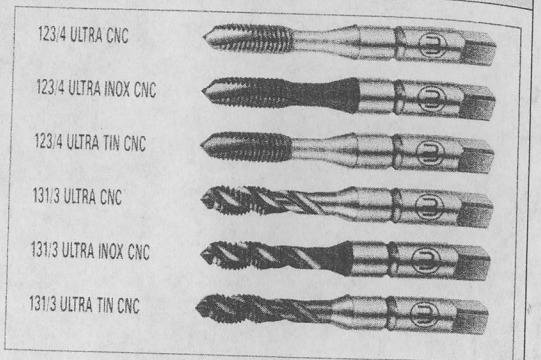


FIGURE 6.36 Tarauds spécifiques pour MOCN. *Doc. Manigley*

Filetage d'extérieur avec outil filière

.1 Généralités

e filetage s'effectue avec des outils de orme – les filières – qui réalisent le filege sur la pièce au diamètre nominal ig. 6.37).
e dévissage s'effectue par inversion du ens de rotation.

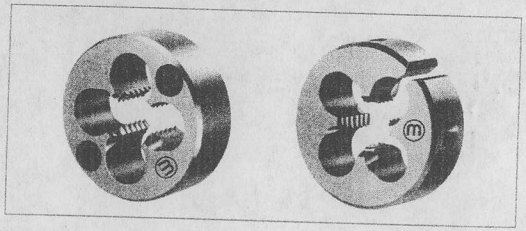


FIGURE 6.37 Filières rondes. *Doc. Manigley*

2 Mouvements générateurs

entiques au taraudage :
ouvement de coupe donné à l'outil.
ouvement d'avance libre (la filière avance à son pas) ou guidé (par CN ou vis-patronne).

5.3 Outils de filetage

Les filières, outils monoblocs, comportent un filetage interrompu par des évidements (trous, rainures) constituant la denture – les peignes – et assurant l'évacuation des copeaux (fig. 6.38).

Denture

Les trous d'évidement des filières dites « rondes » (le corps d'outil étant cylindrique) donnent les angles de coupe.
Une vis de réglage permet d'ajuster la précision du filetage par expansibilité du métal (pour filières fendues) non affûtables (fig. 6.39).
Les filets rodés et ceux de l'entrée conique rectifiés en détalonnage, assurent la coupe avec progressivité et favorisent le positionnement à l'attaque.
Les filières pour filetage conique, au pas du gaz, n'ont pas de réglage (fig. 6.40).

Diamètres des filières rondes

Généralement de M 6 à M 33, et plus particulièrement de 3 à 24 mm pour tous types de filetages. Elles sont conçues en acier rapide (qualité supérieure).

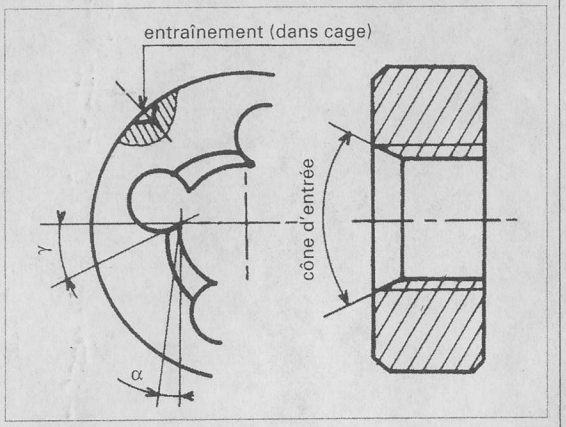
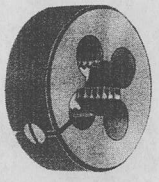
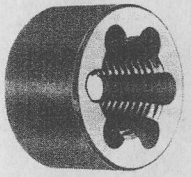


FIGURE 6.38 Angles de coupe d'outil filière.



Acier Super Rapide : HSS
Filets rodés
Entrées rectifiées

FIGURE 6.39 Filière ronde extensible. *Doc. Leclerc*



Acier Super Rapide : HSS
Filets rodés
Entrées rectifiées

FIGURE 6.40 Filière ronde fixe, au pas gaz, conique. *Doc. Leclerc*

5.4 Conditions de coupe

Coupe sous lubrification (section de copeaux relativement importante).

Vitesses de coupe

Identiques à celles du taraudage.
De 2 à 30 m/min selon les matériaux, en particulier du fait des relatives grandes avances (voir fig. 6.24, vitesse de coupe en taraudage).

Vitesse d'avance

Correspond par tour, au pas de l'outil.

5.5 Utilisation

Généralement utilisées en filetage de petits diamètres, par vissage et dévissage avec inversion du sens de rotation de la pièce, l'outil étant maintenu dans une cage de guidage libre axialement (fig. 6.41).

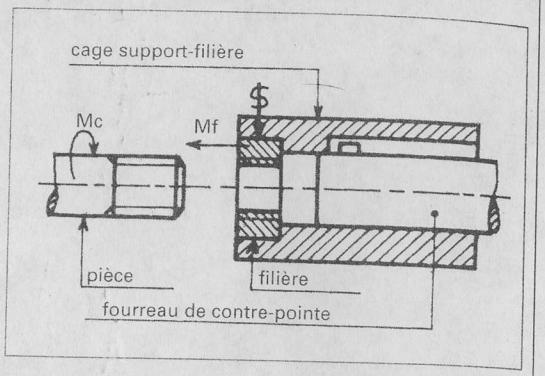


FIGURE 6.41
Support filière en production petite série.

Filières de décolletage

Utilisées sur tours automatiques en filetage en bout de pièces, par vissage et dévissage à vitesse différentielle sans modification de la vitesse de coupe d'autres outils en travail simultané (idem chariotage) (fig. 6.42).

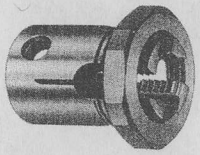


FIGURE 6.42
Filière creuse de décolletage.
Doc. Leclerc

Acier Super Rapide: HSS
Filets rodés
Entrées rectifiées

Filetage d'extérieur par formage à froid

6.1 Principe

Le filetage par formage consiste à former, à froid, à l'aide de molettes cylindriques – les outils – qui impriment leur forme périphérique dans une pièce cylindrique (fig. 6.43).
Le diamètre de l'ébauche est accru, sans variation du volume de matière.
La pièce est libre en rotation et son mouvement résulte de l'entraînement – par frottement et engrènement – des molettes en rotation commandée (équivalence à un mouvement de vis-écrou) dans le même sens et à même vitesse.
La matière est comprimée progressivement entre les molettes aux profils identiques, parallèles et tournant dans le même sens et à même vitesse.
La matière flue parallèlement aux faces des dents des outils-molettes.

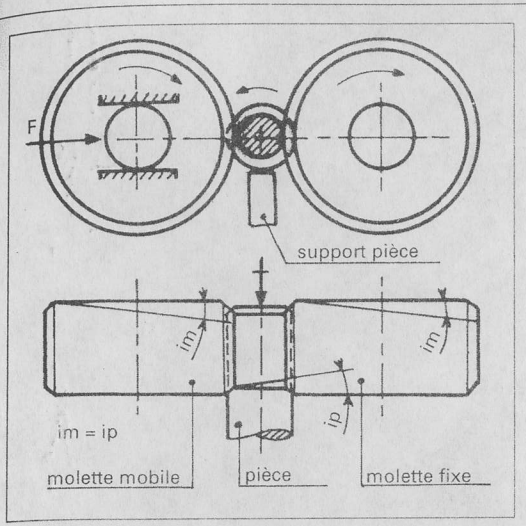


FIGURE 6.43 Schéma de principe du formage de filets à froid.

Le filet est formé durant la rotation des molettes, par les actions élémentaires de chaque filet-outil, la matière fluant parallèlement aux faces de la denture des molettes.
Il y a création d'un cratère au sommet des filets formés, causé par les crêtes produites sur chaque flanc (fig. 6.44).
La jonction des deux crêtes peut provoquer une cratérisation acceptable en général, sauf pour utilisation sanitaire (alimentaire, médicale...) ou sous agression chimique.
Les aciers inoxydables ont plus particulièrement un risque de plissures au sommet des filets.

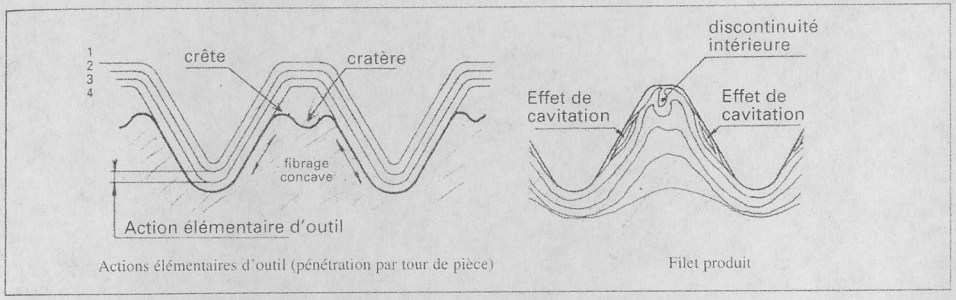


FIGURE 6.44 Action des molettes cylindriques. *Doc. Escofier*

Molettes à profil évolutif et entraxe fixe

Production des filetages, sans cratère (fig. 6.45) (voir chapitre « Obtention des dentures par formage »).

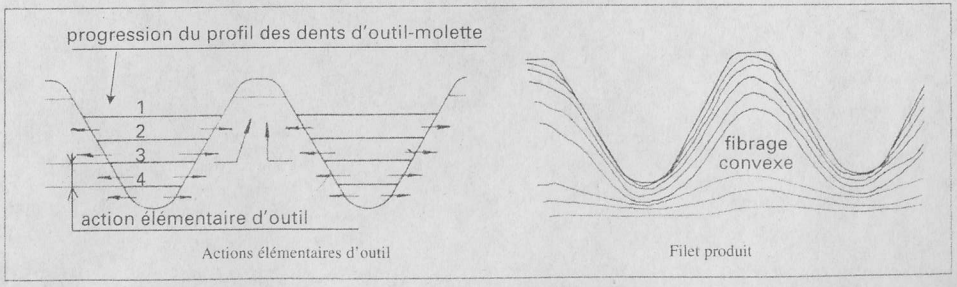


FIGURE 6.45 Action des molettes à profil évolutif. *Doc. Escofier*

Les molettes, étant circulaires, se retrouvent en position initiale après chaque révolution ; les vitesses circonférentielles étant égales, la pièce tourne autour de son axe sans se translater (fig. 6.46).

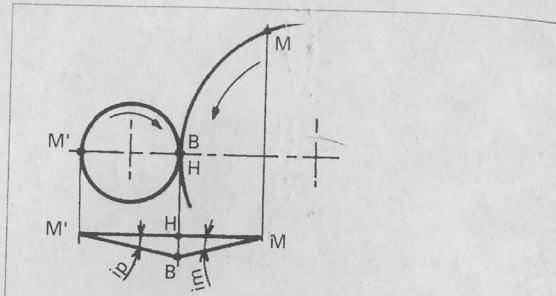
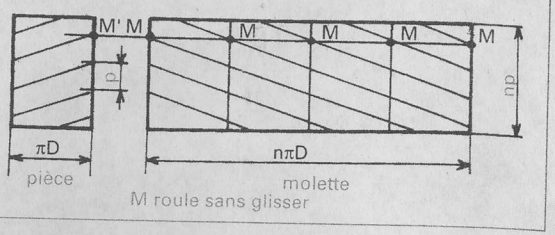


FIGURE 6.46
Mouvements de rotation pièce et molettes.



Caractéristiques des filetages obtenus

Résistance mécanique supérieure au filetage par coupe, avec : forte augmentation de la dureté, de la résistance à la traction et à la fatigue ; excellent état de surface et grande précision.

6.2 Effort de formage

À choisir en fonction des matériaux à travailler, à savoir :
– Si l'effort de formage était trop important – pour avoir un nombre réduit de révolutions des molettes – la pièce serait arrêtée en rotation.
– Si l'effort de formage était relativement faible, le nombre de révolutions serait grand et il y aurait écrouissage excessif du matériau (fig. 6.47).
Pour chaque matériau et chaque profil de filetage correspondent des conditions optimales de formage indiquées par les constructeurs de machines.

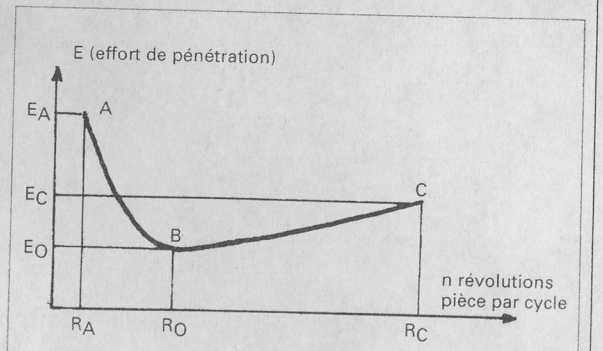


FIGURE 6.47 Variation du nombre de révolutions de pièce en fonction de l'effort de pénétration.

Doc. Escofier

6.3 Outils-molettes

Outils monoblocs, en acier rapide.
Ils ne s'affûtent pas et leur usure est excessivement faible, ce qui assure une qualité continue.

Denture

À filets multiples de même angle d'hélice que le filetage à réaliser et de pas inverse.
Le pas des molettes est nécessairement proportionnel au pas du filetage, et leur profil défini pour un entraxe donné : il faut donc un jeu de molettes semblables par type de pièce à produire (diamètre, pas, profil) (fig. 6.48).
La variation d'entraxe des molettes durant le formage n'a aucune incidence sur les filetages normalisés, qui sont à faible angle d'hélice (inférieur à 4°) et il n'y a pas de distorsion entre la forme des outils et la forme obtenue.

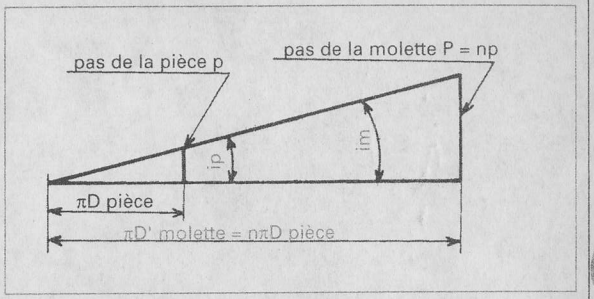


FIGURE 6.48 Caractéristiques géométriques des molettes.

6.4 Matériaux à fileter

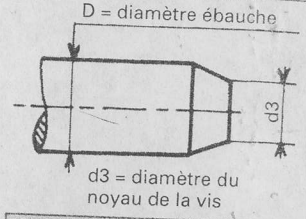
Ils doivent avoir un bon allongement (minimum 7 %) et une bonne striction.
La résistance à la déformation plastique détermine l'effort de formage (et non la résistance mécanique).
Un matériau ductile donne un excellent état de surface (à l'inverse de la coupe).
On met en œuvre les aciers demi-durs, les alliages d'aluminium (ductiles) et de cuivre, le magnésium, le titane...
Le nickel, le chrome, le manganèse, le molybdène dans les aciers alliés améliorent la ductilité (et la résistance au fluage, nécessitant une plus forte pression).

6.5 Mise en œuvre

Ébauches

Les ébauches cylindriques doivent avoir un diamètre déterminé avec précision dimensionnelle et cylindricité : obtention d'un profil de filets « fini » avec bon état de surface (et prolongement de la durée de vie des molettes).
Différents procédés d'obtention des ébauches conviennent (tournées, matricées... trempées et revenues).
Les pièces estampées à chaud seront recuites avant formage.
Se référer aux données du constructeur de machines pour les dimensions, et rectifier de préférence les ébauches.

Tolérance sur ébauche égale au tiers de celle du diamètre nominal du filetage, soit :
h 13/3 (de 0,05 pour Ø 3 à 0,30 pour Ø 300).
Chanfrein d'entrée : De 15 à 30° selon les pas à obtenir et la ductilité des matériaux (pente la plus faible pour les moins ductiles) (fig. 6.49).
Matériaux durs. Le fond de filets devrait être rayonné : évite les angles vifs pouvant générer des criques.



R (daN/mm2)	Pas de... à... (mm)		
	1,5	3	6
⩽ 60	20°	25°	30°
60 à 90	18°	22°	28°
> 90	15°	20°	25°

FIGURE 6.49
Chanfrein d'entrée recommandé sur ébauche en acier.

Pièces à fileter

Selon les machines et les molettes employées, les dimensions varient de :
En plongée : 1 à 300 mm de diamètre pour des longueurs filetées de 40 à 300 mm jusqu'au pas de 20 mm (filets trapézoïdaux).
En enfilade : de 50 à 250 mm de diamètre et des longueurs de plusieurs mètres (vis à billes jusqu'au diamètre des billes de 12,7 mm...).

Vitesse de travail des molettes

Généralement de 30 m/min maximum sous une pression de 80 à 200 KN.
Une période de calibrage de décompression suit la période de déformation.

6.6 Machines

Avec des poussées de 6 à 80 tonnes, selon leurs capacités.
À molettes horizontales, le chargement-déchargement s'effectue aisément par le dessus (filetage en plongée) ou latéralement (filetage en enfilade).
Aucun appareillage n'est nécessaire, si ce n'est pour l'automatisation de l'alimentation (formage continu) et le soutènement des pièces longues (travail en enfilade), d'où une mise en œuvre rapide (fig. 6.50).

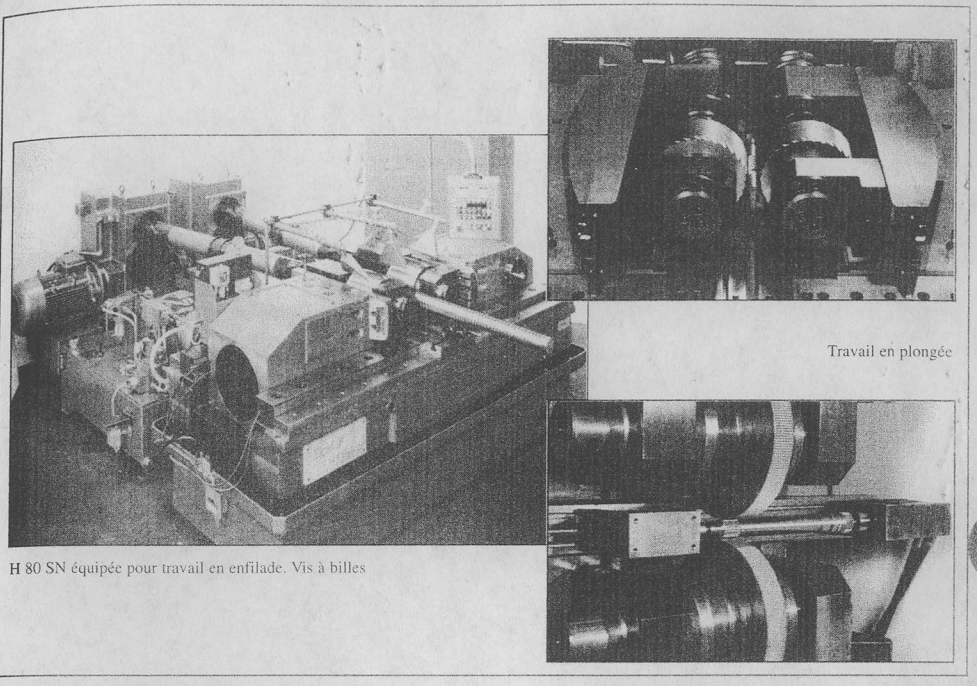


FIGURE 6.50 Phases de filetage par formage à froid. *Doc. Escofier*

6.7 Utilisation

De la petite série à la série illimitée.
La productivité est très grande et directement proportionnelle à la puissance des machines : plus la puissance est élevée, plus la vitesse de rotation pourra être accrue, donc le temps réduit (dans les limites des données du constructeur, pour respecter l'effort de formage par matériau).
Les temps de production sont très courts (quelques secondes, avec 4 à 6 révolutions des molettes).
Avec des outils spécifiques et en travail de plongée, (série illimitée), plusieurs filetages peuvent être réalisés simultanément sur une pièce.

7. Filetage d'extérieur à l'outil-meule

7.1 Généralités

Réalisation avec des meules de forme de filetages d'extérieur, directement sur un cylindre au diamètre nominal.
Rectification de finition pour obtenir un état de surface des filets de grande qualité (fig. 6.51).

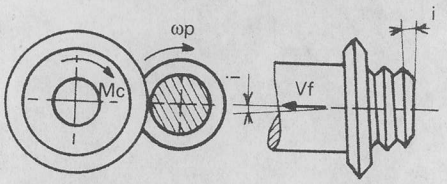


FIGURE 6.51
Schéma de filetage à l'outil-meule.

7.2 Outil

Meule plate taillée au profil du filet.
Elle est inclinée sur l'axe de la pièce de l'angle d'hélice moyenne du filet et se translate axialement du pas du filetage par tour de pièce (pièce et meule recevant des mouvements de rotation).

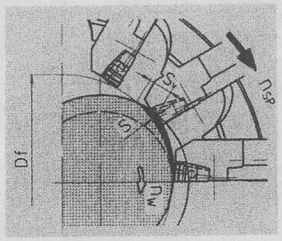
7.3 Machine et utilisation

La rectifieuse, de type cylindrique d'extérieur, étant tout automatique (cycles d'usinage, gestion diamantage et usure de meule, passes d'ébauche, de finition, d'étincelage...) permet la réalisation de filetages longs de haute qualité fonctionnelle (vis à billes...).

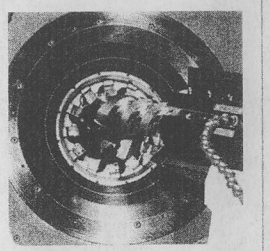
8. Filetage par tourbillonnage

8.1 Généralités

Réalisation de profils à un pas donné sur cylindres de référence, à l'aide d'un groupe d'outils montés sur une couronne tournant autour du cylindre à former (fig. 6.52).
L'axe de la couronne est décalé de l'axe du profil à obtenir et les outils tournent à vitesse – de coupe – supérieure à celle de la pièce.



Action de coupe des outils élémentaires



Opération de tourbillonnage d'une vis

FIGURE 6.52
Tourbillonnage d'un profil.
Doc. Weingärtner

8.2 Outils de coupe

Outils élémentaires de forme convergeant vers le centre de la couronne (fig. 6.53).
Chaque outil élémentaire enlève un copeau en virgule par fraisage à chaque tour du porte-outil, provoquant un effort transversal très réduit.

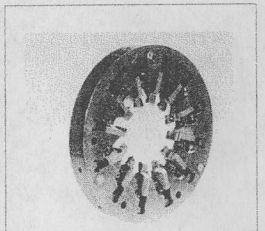


FIGURE 6.53
Couronne porte-outil avec outils élémentaires.
Doc. Weingärtner

8.3 Machine et utilisation

Spécifique, de 5 à 6 axes numérisés, produisant des profils en tourbillonnage et profilage d'extérieur et d'intérieur, éventuellement synchronisés (fig. 6.54).
Production de filetages de tous profils (vis d'extrusion, d'injection...) sur des pièces longues et très longues (12 mètres maxi sur machine de Weingärtner) (fig. 6.55).

Nota : le polissage de profils type à vis s'effectue sur machine utilisant l'abrasif fixe sur bande (fig. 6.56).

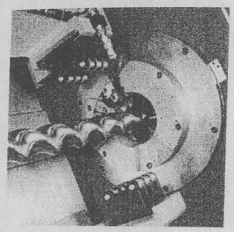


FIGURE 6.54 Tourbillonnage synchronisé avec un profilage.

Doc. Weingärtner

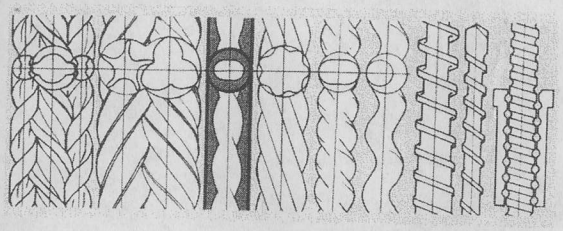


FIGURE 6.55 Différentes pièces réalisables en tourbillonnage.

Machine VARIO de Weingärtner

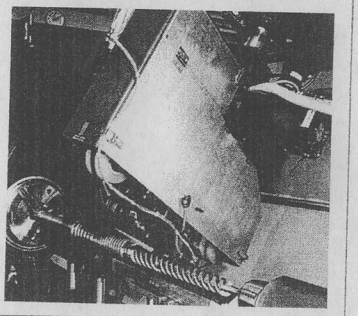


FIGURE 6.56 Opération de polissage à la bande abrasive sur machine spécifique.

Doc. Weingärtner

7 PROCÉDÉS DE FORGEAGE

1. Généralités 195
   1.1 Principe 195
   1.2 Différents procédés 195
   1.3 Taux de corroyage 196
   1.4 Fluage du matériau 196
   1.5 Solide de frottement 197
   1.6 Efforts de forgeage 197
   1.7 Matériaux de forgeage 198
   1.8 Pièces estampées et forgées 198
   1.9 Dimensions des pièces « brut de forge » 199
   1.10 Tolérances d'estampage 199
   1.11 Machines de forgeage 200
2. Forgeage libre 201
   2.1 Généralités 201
   2.2 Étirage 201
   2.3 Estampage 201
   2.4 Refoulement 202
   2.5 Dégorgeage 202
   2.6 Poinçonnage 202
   2.7 Mandrinage 203
   2.8 Bigornage 203
   2.9 Rétreinte 203
   2.10 Élargissement 204

3. Estampage et matriçage 205
3.1 Généralités 205
3.2 Définition du lopin 206
3.3 Roulage 207
3.4 Cambrage 210
3.5 Étirage 211
3.6 Gravures d'estampage et matriçage 211
3.7 Joints de matrices 214
3.8 Dépouilles 215
3.9 Surface des plans de joint 215
3.10 Outillage 216
4. Estampage horizontal 219
4.1 Généralités 219
4.2 Matrices 219
4.3 Bavure d'estampage 220
4.4 Mise en œuvre 220
4.5 Pièces obtenues 221
4.6 Utilisation 221
5. Formage à chaud 222
5.1 Généralités 222
5.2 Bigornage ou laminage circulaire 222
5.3 Rétreinte 222
5.4 Filage à chaud 223
5.5 Fluotournage à chaud 223

1. Généralités

1.1 Principe

Le forgeage consiste à obtenir des pièces métalliques de formes et de dimensions diverses, par fluage du matériau rendu plastique (en le chauffant) sous l'action de chocs importants ou de pression élevée, à partir d'un lopin de matière (fig. 7.1).

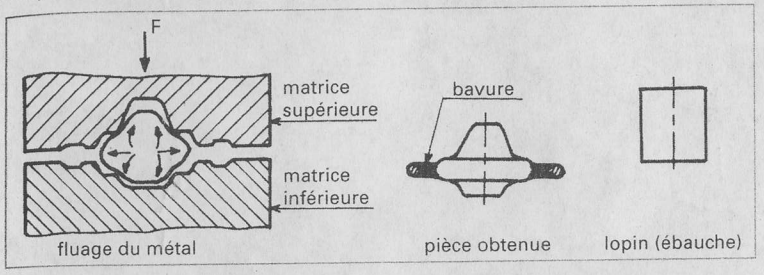


FIGURE 7.1
Estampage d'un lopin.

Il produit un fibrage longitudinal du matériau, permettant la production de pièces mécaniques du meilleur rapport résistance/masse (fig. 7.2).

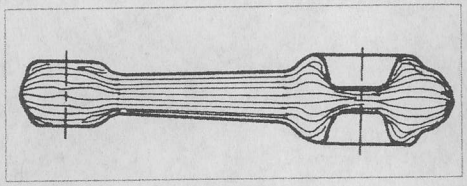


FIGURE 7.2
Illustration de fibrage du métal forgé.

1.2 Différents procédés

Le choix d'un procédé est fonction, en particulier, de la quantité à produire, ce qui conditionne l'outillage à utiliser.
Les procédés de formage sont :

Forgeage libre

Effectué sous chocs, sans outillage spécifique à la pièce à obtenir.
La déformation du volume de matière à forger s'effectue dans toutes les directions (fig. 7.3).

Estampage et matriçage

Effectués sous chocs ou pression, avec un outillage spécifique pour chaque type de pièces à obtenir.
La déformation du volume de matière à forger est orientée et limitée dans une empreinte, la gravure de la matrice.

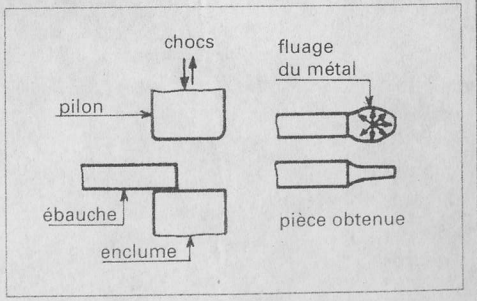


FIGURE 7.3 Forgeage libre.

Nota : Ces deux termes définissent le même procédé ; dans la pratique, on distingue :
Estampage : forgeage des aciers.
Matriçage : forgeage des métaux non ferreux qui sont plus couramment forgés en outillage fermé.

Formage à chaud

Effectué selon une opération de forgeage (bigornage et rétreinte) et les procédés de filage et fluotournage.
Le matériau est forgé à chaud pour fluer dans l'outillage d'estampage et de matriçage (ou entre les tas de frappe en forgeage libre).

Températures de forgeage

Elles se situent entre : 800 à 1 200°C, selon le % de carbone, pour les aciers (fig. 7.4) ;

350 à 420°C pour les alliages légers ; 700 à 900°C pour le cuivre et le bronze.

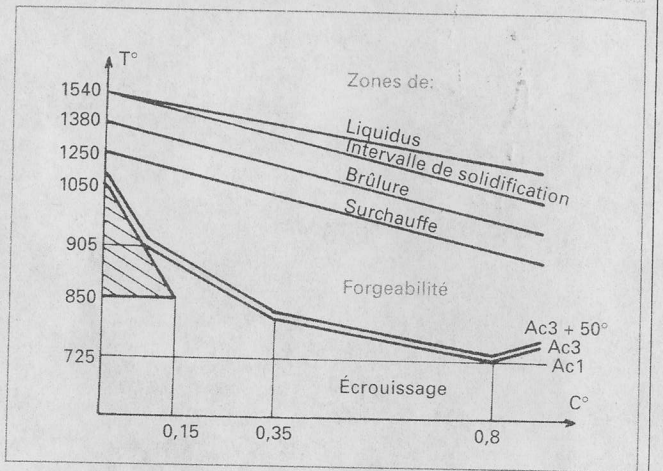


FIGURE 7.4
Zone de forgeabilité des aciers au carbone.

1.3 Taux de corroyage

L'aptitude au fluage – l'étirement du matériau – est définie par le taux de corroyage pratique : section initiale/section produite.
Cette valeur varie de 3 à 8.

1.4 Fluage du matériau

Le matériau, isotherme, flue du côté des surfaces qui sont libres, ce qui permet de définir :
la méthode opératoire en forgeage libre ;
les formes d'ébauches en estampage - matriçage.

Nota : La matière flue plus aisément en direction (s) parallèle (s) au plus petit côté de la surface forgée (fig. 7.5).

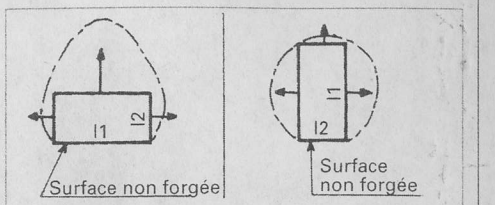


FIGURE 7.5
Fluage du métal

l2 < l1 : fluage maxi parallèle à l2

1.5 Solide de frottement

Dans la zone chauffée du lopin, sous l'effet de forgeage, les fibres du matériau, avec surfaces de contact outil/lopin, se dévient plus lentement qu'à la hauteur médiane du lopin. Ces deux volumes de fibres sont désignés sous le terme de solides de frottement (fig. 7.6).

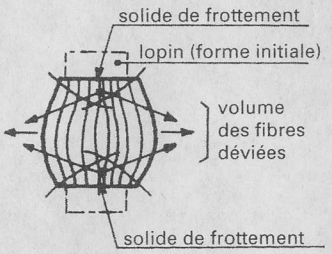


FIGURE 7.6
Schéma de déformation au forgeage de la matière chauffée.

1.6 Efforts de forgeage

Pratiquement, on détermine par excès l'effort de forgeage :

$$F\ (\text{daN/mm}^2) = S.\ p.\ h.$$

avec
S (mm^2) = surface du lopin ou de la pièce après écrasement (l'effort croît durant *l'écrasement)* ;
P (daN/mm^2) = effort spécifique de déformation, fonction de la température de chauffe et du seuil de plasticité k du matériau compressé ;
h = hauteur de la gravure.

Seuil de plasticité

k = Rapport hauteur obtenue/diamètre d'un lopin cylindrique (fig. 7.7)

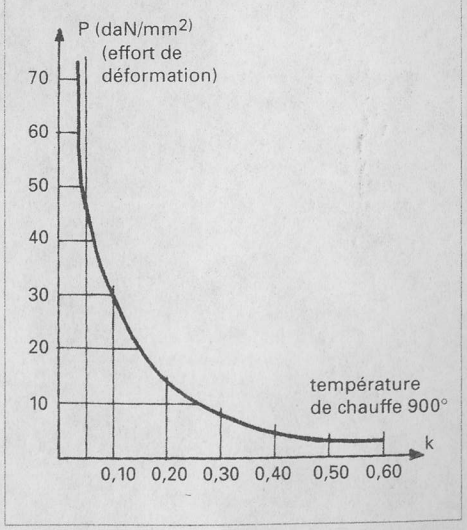


FIGURE 7.7
Seuil de plasticité d'aciers non alliés.

Détermination des efforts de forgeage

définir par excès :

Forgeage libre, au marteau-pilon (travail par chocs) ≅ 2,5 F

Forgeage libre à la presse (machine à forger horizontale) ≅ F

orgeage avec outillage (jusqu'à « fermeture » des matrices) ≅ *F* en considérant S = surfaces e la pièce définie au plan de joint et du cordon de matrices.

1.7 Matériaux de forgeage

ous les métaux ayant une cer- ine plasticité sont forgeables à des températures spécifiques, es caractéristiques mécaniques ariant en fonction des tempéra- res de chauffe (fig. 7.8).

Principaux métaux et alliages ouramment utilisés :

ciers : d'usage courant (A65, 48...) ; non alliés (XC10, C18...) ; faiblement alliés 38 CD 4, 100 C6...) sous 900 à 200 °C, selon les nuances.

liages d'aluminium : (5754, 017A...) ; sous 350° à 500 °C elon les nuances.

upro-alliages (CU Al 9, Cu Zn 39 2...) sous 750 à 900 °C.

aitons : (Cu Zn 33 Pb2...) sous 0 à 800 °C.

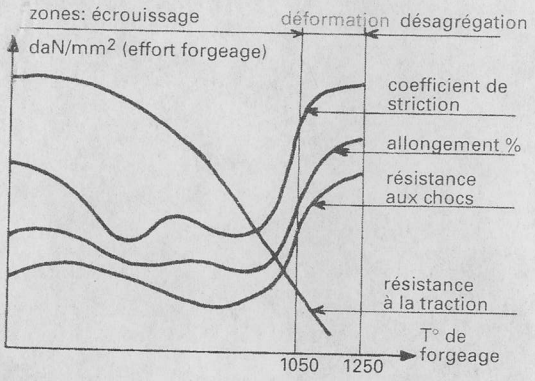


FIGURE 7.8 Allures de variations de caractéristiques mécaniques selon la température de chauffe.

1.8 Pièces estampées et forgées

roduction de petites et grosses pièces, avec productivité par rapport aux autres procédés btention de bruts métalliques.

osses pièces : produites de 10 à 100 pièces à l'heure.

etites pièces : produites jusqu'à plus de 1 000 pièces à l'heure avec des machines automa- ques.

néralement : de type cylindrique, courtes pleines ou creuses, longues pleines, qui devront oir de fortes sollicitations, et en particulier, la fatigue (vilebrequins de moteurs thermiques, gnonnerie...).

Pièces épaulées

forme cylindrique avec un seul épaulement, présentant une grande différence de dia- ètres : obtenue économiquement par deux procédés (forgeage et soudage) (fig. 7.9).

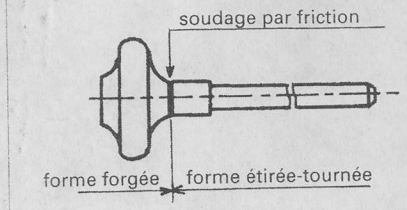


FIGURE 7.9
Conception d'une pièce cylindrique épaulée.

1.9 Dimensions des pièces « brut de forge »

Au dessin de définition du « produit fini », ajouter les surépaisseurs d'usinage, définissant le produit brut de forge (fig. 7.10).

Surépaisseurs d'usinage minimales

À considérer, selon les dimensions des formes, pour chaque face (ou de chaque côté d'un diamètre) :

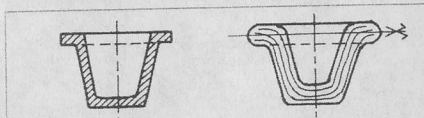


FIGURE 7.10 Formes d'une pièce usinée et brute de forgeage.

Dimension des formes	Jusqu'à 25 mm	De 25 à 50 mm	De 50 à 100 mm	de 100 à 200 mm	de 200 à 400 mm	Au-delà de 400 mm
Surépaisseurs d'usinage	0,5 à 1 mm	1 à 1,5 mm	1,5 à 2 mm	2 à 2,5 mm	3 à 4 mm	4,5 à 7 mm

1.10 Tolérances d'estampage

À la définition du produit brut, ajouter les dépouilles, les rayons de raccordement supprimant toutes les arêtes, les tolérances d'estampage (dimensionnelle, géométrique, de déport).

Nota : Pour toutes les tolérances, selon les caractéristiques des pièces à obtenir par estampage au marteau-pilon, à la presse verticale, à la machine à forger horizontale, se référer aux normes.

Tolérances dimensionnelles

Pour toutes les dimensions, suivant une direction, elles sont identiques à celle de la plus grande dimension.

À répartir suivant 2/3 à l'écart supérieur et 1/3 à l'écart inférieur, pour les qualités normalisées (F : normal, E : serrée).

1.11 Machines de forgeage

Conçues pour supporter les deux matrices de l'outillage.
La matrice « inférieure » est fixée sur le tas fixe.
La matrice « supérieure » est solidarisée au tas opposé qui est mobile pour effectuer le travail de déformation.

Moutons et marteaux-pilons

Machines-outils où le tas mobile est animé pour frapper, par chocs importants (fig. 7.11), à vitesse de frappe mini de six mètres/seconde.
Les marteaux-pilons sont à simple ou double effet, produisant 50 à 100 coups/minute.

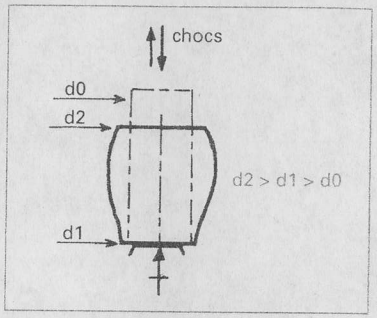


FIGURE 7.11
Schéma de déformation libre d'un lopin en forgeage par pression.

Presses à forger

Machines travaillant par pression (fig. 7.12), avec des efforts importants et une faible vitesse d'avance (1 m/s maxi).
Ces machines sont de conception verticale ou horizontale.
Presses verticales : produisent des efforts de 50 000 à 10 000 000 daN
Presses horizontales. Appelées machines à forger horizontales, elles sont utilisées en forgeage par refoulement d'une extrémité de lopins cylindriques. Elles peuvent être à chauffage électrique intégré, et sont automatisables.

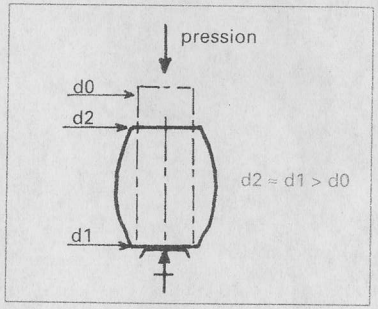


FIGURE 7.12 Schéma de déformation libre d'un lopin en forgeage par pression.

Unité de production

Comprend un four de chauffe, une machine d'ébauche (marteau-pilon ou laminoir) une machine de finition (marteau-pilon ou presse), une presse d'ébavurage-débouchage.

2. Forgeage libre

2.1 Généralités

Formage à chaud d'un lopin de matière ou d'une pièce semi-ouvrée située entre deux tas, sous l'action de chocs importants.
Selon la déformation provoquée, les **principales opérations de forgeage** sont :
étirage, estampage, refoulement, dégorgeage, poinçonnage, mandrinage, bigornage, rétreinte, élargissement.

2.2 Étirage

Allongement d'un lingot ou d'une pièce semi-ouvrée par diminution de sa section.
L'allongement s'effectue du côté de la plus petite section du lopin, dû à la résistance du matériau adjacent à la surface forgée (fig. 7.13).

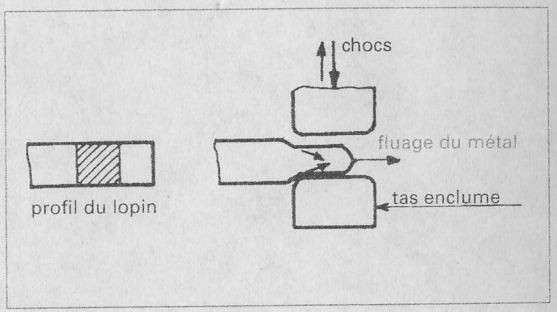


FIGURE 7.13 Opération d'étirage.

2.3 Estampage

Mise au rond d'un lopin étiré par forgeage, entre tas de forme ou étampes (fig. 7.14).

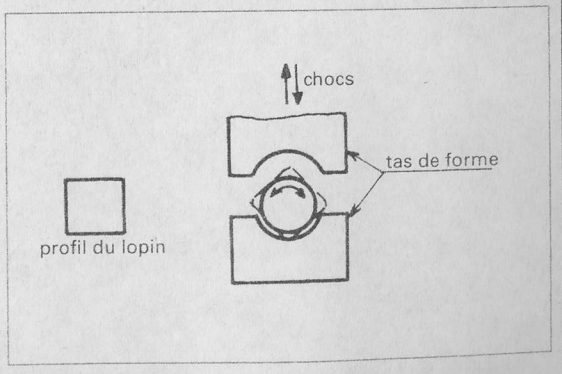


FIGURE 7.14
Opération d'estampage.

2.4 Refoulement

Augmentation de section d'une zone d'un lopin, tout en réduisant sa longueur (fig. 7.15).

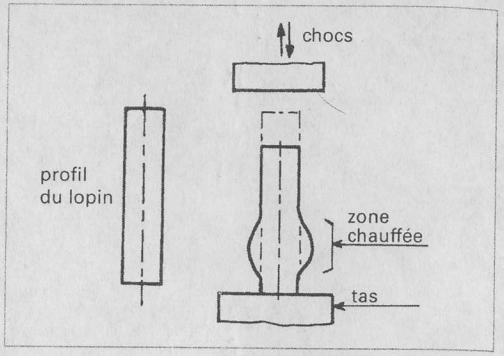


FIGURE 7.15
Opération de refoulement.

2.5 Dégorgeage

Réalisation d'une ou deux gorges sur un lopin, afin de situer et permettre, par étirage, une modification de section (fig. 7.16).

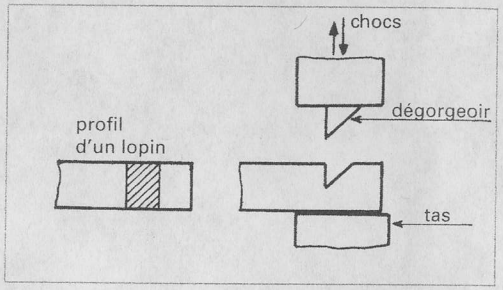


FIGURE 7.16
Opération de dégorgeage.

2.6 Poinçonnage

Réalisation dans un lopin d'un trou non calibré (de forme conique) (fig. 7.17).

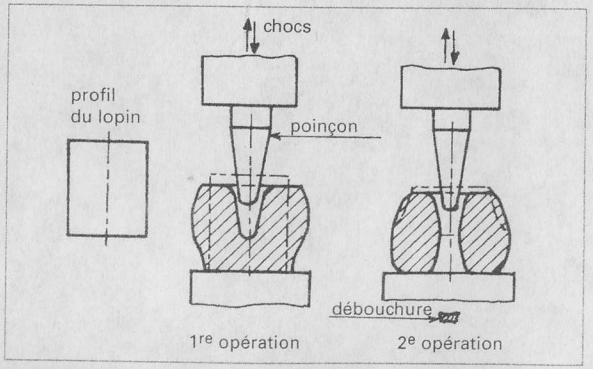


FIGURE 7.17
Opération de poinçonnage.

2.7 Mandrinage

Calibrage d'un trou, obtenu préalablement par poinçonnage (fig. 7.18).

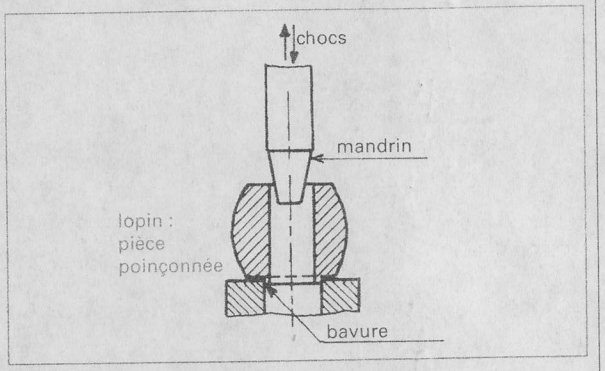


FIGURE 7.18
Opération de mandrinage.

2.8 Bigornage

Accroissement de diamètre d'une couronne métallique provoquant un fibrage circulaire (fig. 7.19).

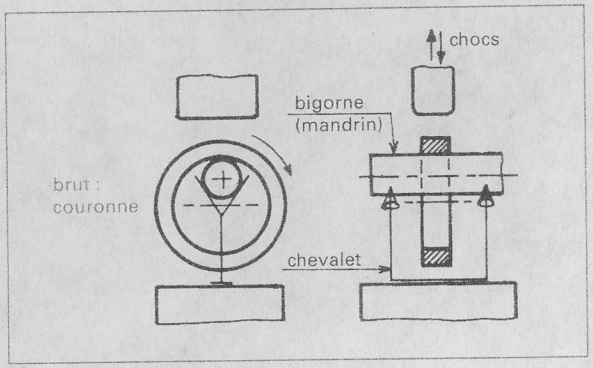


FIGURE 7.19
Opération de bigornage.

2.9 Rétreinte

Diminution de diamètre extérieur d'un lopin tubulaire, avec son allongement. Afin de calibrer éventuellement un alésage, on utilise un mandrin durant l'opération (fig. 7.20).

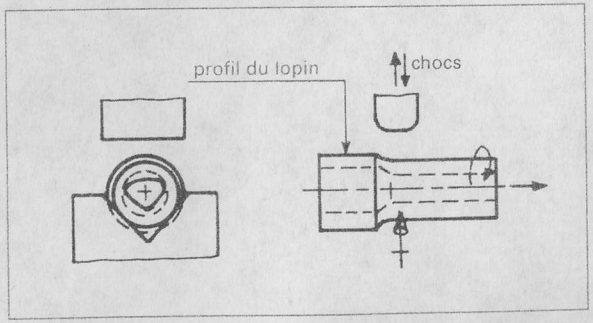


FIGURE 7.20
Opération de rétreinte.

2.10 Élargissement

Élargissement d'une extrémité de lopin ou de semi-ouvré, généralement après dégorgeage (fig. 7.21).

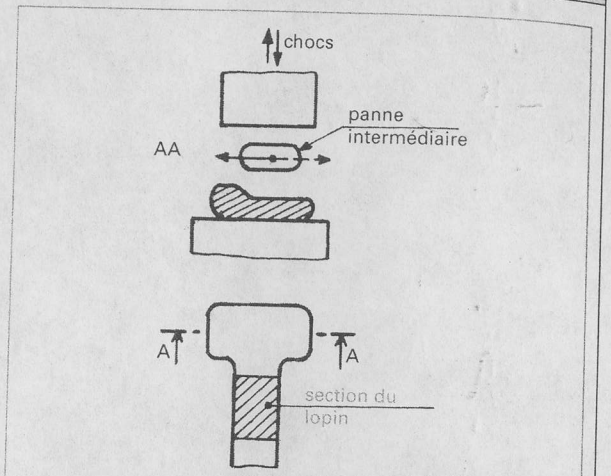


FIGURE 7.21
Opération d'élargissement.

3. Estampage et matriçage

3.1 Généralités

Estampage ou matriçage : même procédé.
Forgeage « non libre » à chaud, d'un lopin de matière ou d'une pièce semi-ouvrée, placée dans un outillage constitué de deux matrices comprenant la ou les empreintes de la pièce à obtenir.
Sous l'intensité des forces appliquées, le matériau flue dans les matrices.

Répartition de la matière

À définir préalablement pour remplir complètement les gravures des matrices de finition, par une ou plusieurs opérations : étirage, roulage, cambrage du lopin, estampage, ébauche de la forme finale (fig. 7.22).

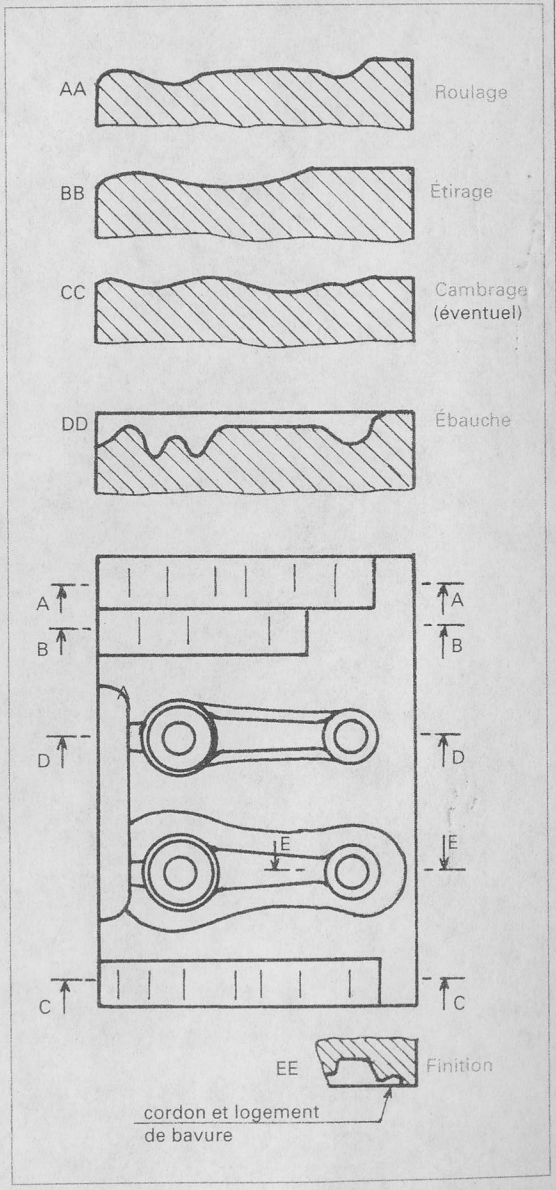


FIGURE 7.22
Vue partielle de matrice inférieure d'estampage avec ensemble des opérations de forgeage non libre.

7

2 Définition du lopin

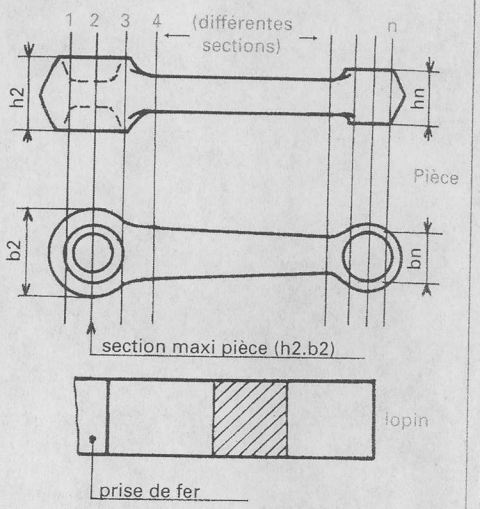
Volume du lopin à prévoir généralement supérieur à celui de la pièce « brut de forge » à obtenir (impossibilité de répartir exactement la matière dans les opérations successives d'ébauche et pertes d'estampage).

Volumes

Les volumes de la matrice d'ébauche, de la matrice de finition et du lopin sont égaux.

Section du lopin

Correspond généralement à la plus grande section majorée équivalente de la pièce (section de la pièce et pertes d'estampage) (fig. 7.23).



section du lopin ⊠ ou ø ≃ section maxi pièce + pertes d'estampage

FIGURE 7.23
Section du lopin d'une pièce.

Longueur du lopin

Volume pièce/section du lopin + prise de fer (maintien du lopin).

Lopin de section inférieure à la section maximale :

pour pièce dont la plus grande section est courte (faible volume à remplir par écoulement) (fig. 7.24).

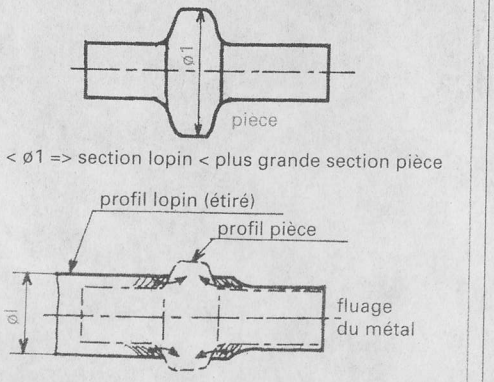


FIGURE 7.24
Lopin de section inférieure à la section maximale de la pièce.

Bavure et cordon de matrice

Situés sur le pourtour de la pièce au niveau du plan de joint.

Produits par l'écoulement du métal excédentaire qui déborde de l'empreinte de finition en particulier (fig. 7.25).

Le cordon de matrice (ou de bavure) freine le fluage du métal.

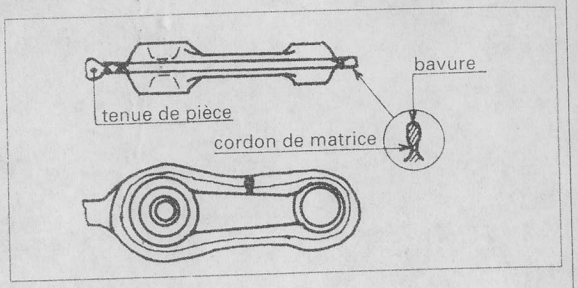


FIGURE 7.25 Bavure de métal excédentaire d'une pièce forgée.

Pertes d'estampage

La bavure en particulier. Le pourcentage de perte varie selon les sections des pièces à obtenir (fig. 7.26).

Pourcentage de majoration de masse

Varie pour une pièce donnée, selon la variation de ses formes.

Sections faibles (formes plates) ≃ 13 % de la masse du lopin.

Sections épaisses (formes prismatiques ou cylindriques) ≅ 6 %.

Sections très épaisses (formes hautes) ≅ 3 %.

Raccordements (toutes sections) ≅ 18 %.

Perte au feu par oxydation à chaud, de 3 à 6 %. S'ajoute à la masse du lopin définie pour forger la pièce.

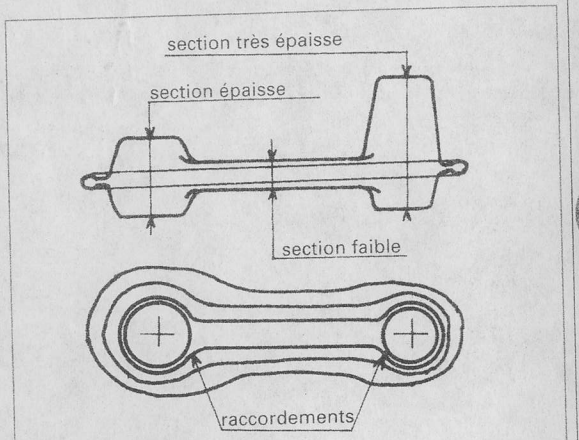


FIGURE 7.26 Zones de perte de métal à l'estampage.

3.3 Roulage

Répartition de la matière en sections élémentaires : elles doivent correspondre aux différentes sections de la pièce à obtenir, par forgeage du lopin dans une empreinte spécifique de la matrice (fig. 7.27) ou par laminage à chaud entre des galets de forme.

Forme de roulage

À définir selon le profil de la pièce « brut de forge » qui peut être : pleine (sans toile ni cambrure) ; avec toile(s), avec cambrure(s).

Elle est constituée de formes successives définies en sections cylindriques ou prismatiques (carrées), sans variations brusques des sections (bavure importante).

Son étude permet de définir les différentes sections et les masses : de la pièce, de la forme roulée, du lopin (pièce et pertes d'estampage).

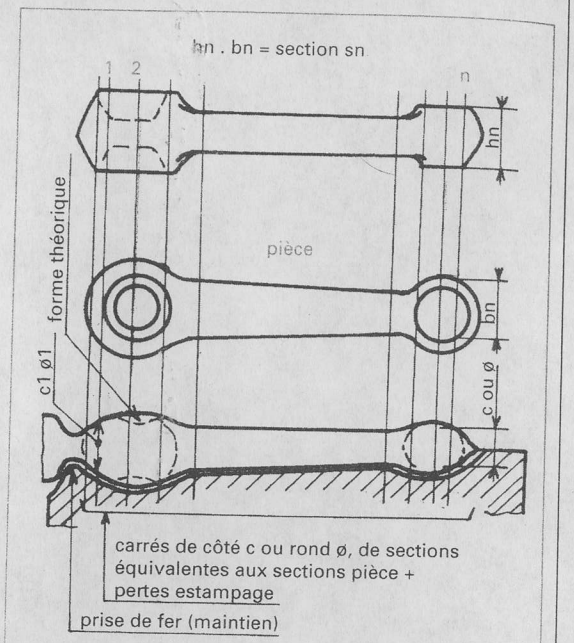


FIGURE 7.27
Forme de roulage d'une pièce.

Surfaces des sections de la forme de roulage

déterminer avec leurs équivalences en formes (rondes ou carrées) des sections de la pièce brut de forge » correspondante, majorées des pertes d'estampage.

Profil de la forme de roulage

acé en considérant, pour chaque section, le diamètre du rond ou le côté du carré équivalent section à celle du brut de forge majoré (des pertes d'estampage).

Mise en œuvre du roulage

s formes de roulage s'obtiennent à l'aide un outillage spécifique de laminage à aud des lopins (grande productivité en oduction de série).

lopin est introduit entre deux demi-galets otorisés qui l'entraînent en le laminant à la rme usinée sur le couple de galets g. 7.28).

minoir dit de retour

omprend plusieurs couples de galets per- ettant, en fonction du taux de réduction mis, d'obtenir la forme de roulage désirée. passes successives forment des sections luites différentes (exemple: ovale, puis

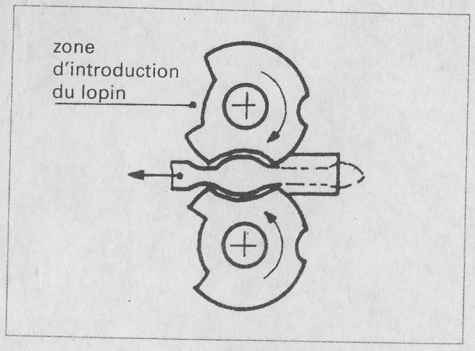


FIGURE 7.28 Laminage à chaud de la forme de roulage.

prismatique) permettant un meilleur entraînement (fig. 7.29).
Chaque couple de galets est défini pour une passe de laminage (forme et longueur approchée de la partie à laminer).

Taux de réduction

Réduction maximale de section entre deux passes:

$$R\,\% = (S_0 - S_1/S_0) \times 100,$$

avec
S_0 section avant une passe de laminage;
S_1: Section après cette passe.
R % maxi admis: 45 % (première passe) à 20 % (dernière passe) en température de forgeage (1 000 à 1 200 °C) avec demi-galets de diamètre ≅ 10 diamètres ou côtés du lopin.

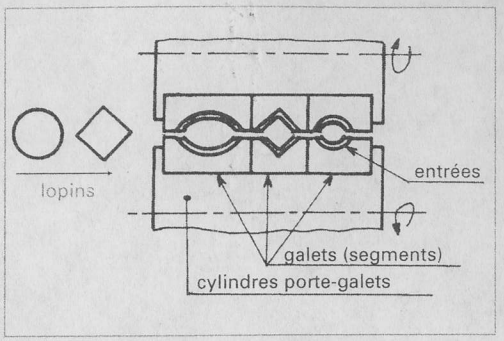


FIGURE 7.29 Schéma d'outillage pour laminage de retour.

Pièces pleines sans toile de cambrure

Positions des différentes sections de la pièce: à situer par approximation, compte tenu des variations du profil-pièce.
Chacune des sections, y compris les zones de raccordement, est à augmenter du pourcentage de majoration de masse dû aux pertes d'estampage.
On détermine, connaissant les dimensions du brut de forge:
– la forme de roulage à estamper à partir du lopin;
– les volumes de la pièce « brut de forge » et du lopin avec la bavure d'estampage.

Pièces avec une toile

La toile des pièces estampées, qui relie les formes de la pièce, subsistera ou sera éliminée après réalisation de forgeage, selon la définition du produit fini (usiné).
Toile reliée à la bavure de forgeage. Reliant les deux côtés d'une entaille: à éliminer par poinçonnage (fig. 7.30).
Grande toile. La forme de roulage peut être modifiée pour faciliter le fluage du matériau (fig. 7.31).

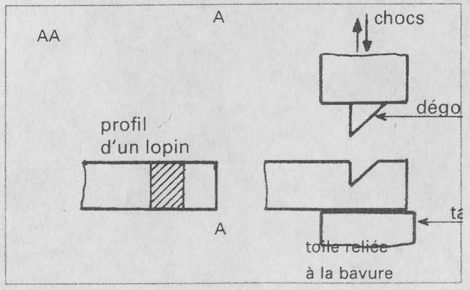


FIGURE 7.30 Pièce estampée avec bavure et toiles.

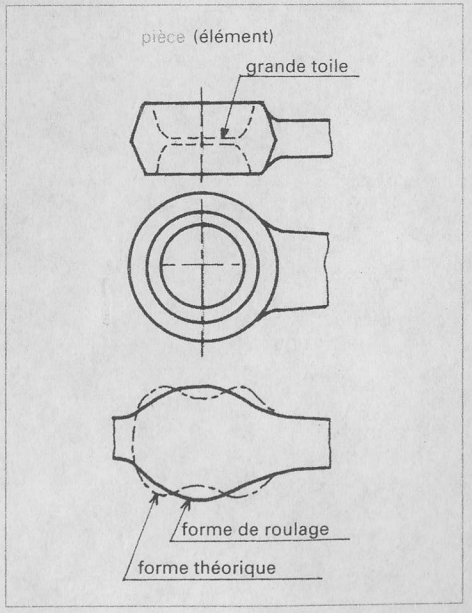


FIGURE 7.31 Forme de roulage d'une pièce avec grande toile.

Épaisseur moyenne des toiles *e*

Choisie en fonction de leurs dimensions et de la hauteur maxi d'empreinte *h* (par rapport au plan de joint) (fig. 7.32).

On admet : $h \leq 20$ mm, $e \leq 3$ mm ;
$20 < h \leq 30$, $e \cong 4$ mm ;
$30 < h \leq 40$, $e \cong 5$ mm ;
$40 < h \leq 60$, $e \cong 6$ mm ;
$h > 60$, $e \cong 7$ mm.

Pièces avec une extrémité de forte section

À refouler sur machine à estamper horizontale (fig. 7.33).

Avant estampage, une extrémité volumineuse peut s'obtenir en ébauche : refoulement libre du matériau sous température continue de forgeage (par résistance électrique) (fig. 7.34).

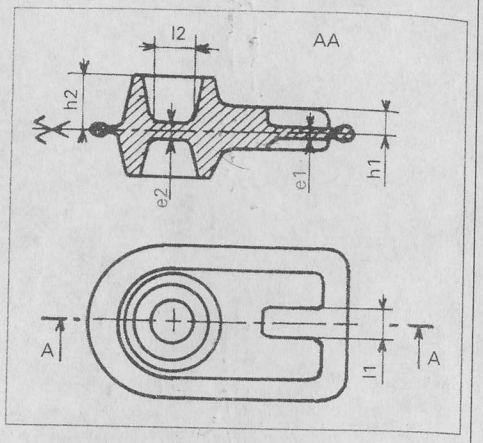


FIGURE 7.32 Épaisseurs des toiles.

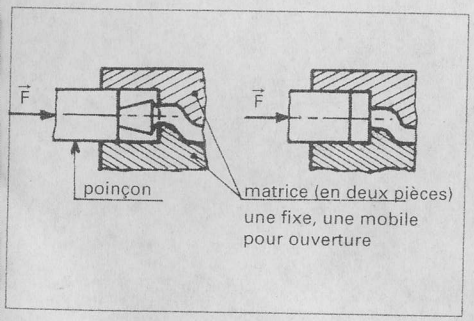


FIGURE 7.33 Schéma de refoulement d'une forme de grand diamètre dans l'outillage.

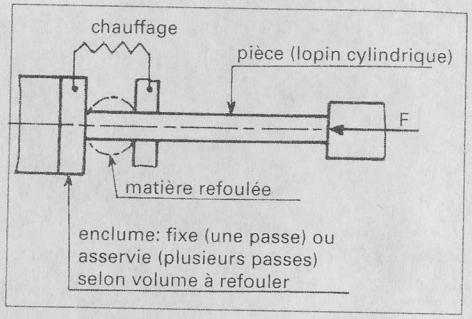


FIGURE 7.34 Schéma de refoulement libre en ébauche d'une forme de grand diamètre.

3.4 Cambrage

Déformation du lopin, après roulage, suivant une courbe de grand rayon (cintrage) ou de faible rayon (coudage).

Permet à la forme de roulage de s'insérer dans l'empreinte ébauche.

Forme de roulage développée

Sa longueur se détermine en fonction de l'allongement au cambrage, d'après rayon de courbure *r* et côté *C* ou diamètre Ø de la forme roulée (fig. 7.35).

Le fluage du métal déplace le CdG de la cambrure vers l'intérieur de la forme courbée : la forme roulée développée sera réduite en fonction de la variation du déplacement *f* de la ligne des CdG.

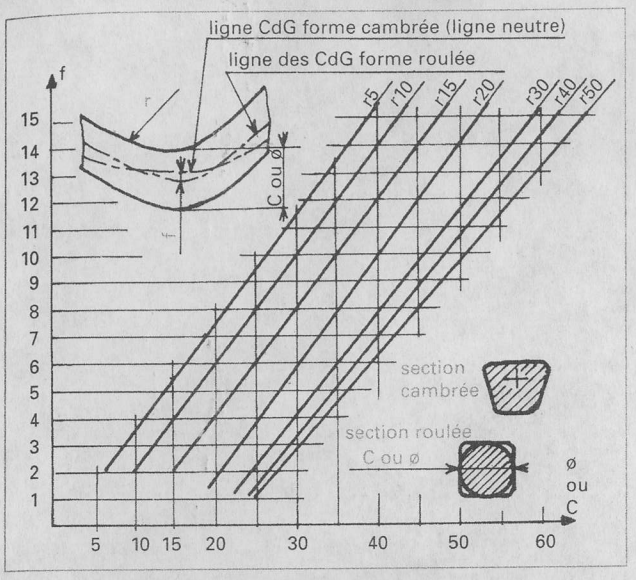


FIGURE 7.35
Valeurs approchées de f en fonction du rayon de courbure r et de l'épaisseur de la forme roulée C ou Ø.

Pièces comportant plusieurs cambrages (cas des vilebrequins)

Longueur de la forme de roulage considérée comme identique à la pièce « brut de forge ».

La forme de cambrage est de même longueur que la forme de roulage.

3.5 Étirage

Allongement du lopin effectué, en première opération, lorsque les sections de la pièce sont très différentes.

Le lopin a une section équivalente à celle de la plus grande section de la pièce. Sa longueur peut être très inférieure à celle de la pièce.

3.6 Gravures d'estampage et matriçage

Les outillages comprennent des gravures pour les diverses opérations de forgeage nécessaires à une pièce ; étirage, roulage, renvoi ou cambrage, estampage ébauche, estampage finition.

Gravure ou empreinte d'ébauche

Souvent nécessaire pour :
- assurer la répartition du métal de la forme de roulage ;
- permettre le remplissage de la gravure de finition, avec $R \cong 2/3\ h$ (fig. 7.36).

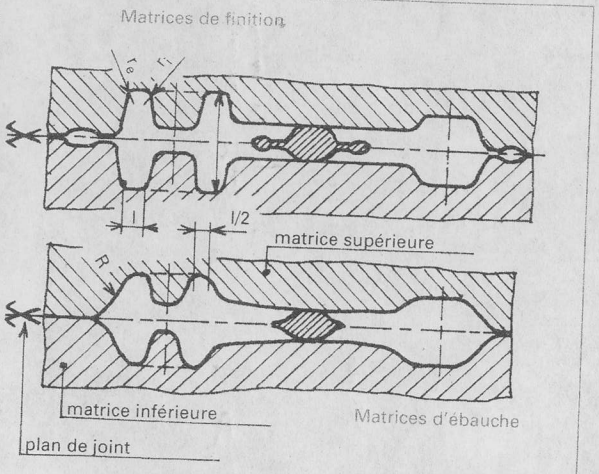


FIGURE 7.36
Gravures (ou empreintes) de finition et d'ébauche d'une pièce.

La gravure d'ébauche accroît la durée de vie de l'outillage (réduction d'usure de la gravure de finition).

Gravures de grandes dimensions

Afin d'assurer le remplissage de formes relativement grandes sans risque de défauts (criques et replis), la gravure d'ébauche a la forme logarithmique : permet, en déformation libre, le fluage du matériau (considéré dans toutes les directions possibles).

Gravures de finition

Les dimensions sont celles de la pièce « brut de forge » (au maximum pour cotes intérieures ; au minimum pour cotes extérieures), majorées du retrait du matériau au refroidissement (fig. 7.36).

Rayons de raccordement et épaisseurs des formes élémentaires

Sont fonction de la largeur *l* ou du diamètre *d* de la pièce, et de la machine utilisée (presse ou marteau-pilon). On admet rayons d'intérieur $r_i \cong 0{,}02$; *l* ou *d* intérieur ; rayons d'extérieur $r_e \cong 0{,}015$; *l* ou *d* extérieur.
Les signes de raccordement de deux sections distinctes (petite et grande) assurent le fluage de la forme ébauche dans la gravure de finition.

Logement de bavure

De capacité supérieure à la bavure prévisionnelle.
À répartir généralement sur les deux coquilles, avec le cordon de matrice (fig. 7.37).

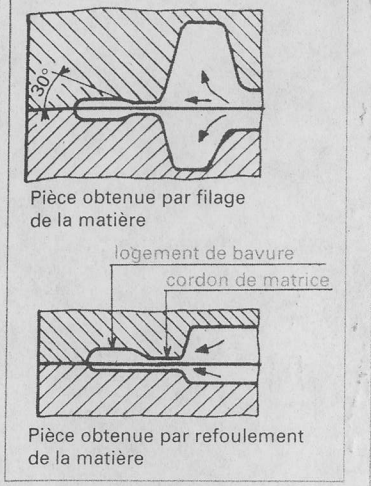


FIGURE 7.37 Logements de bavure fermés.

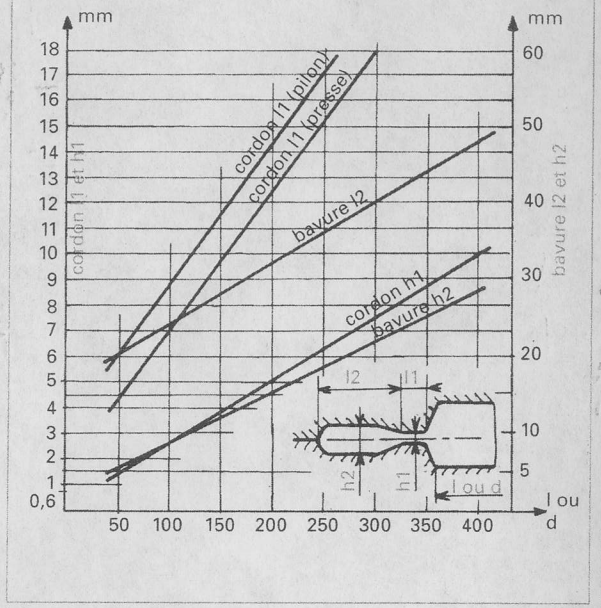


FIGURE 7.38
Valeurs approchées des dimensions de logement de bavure et cordon de matrice.

Logement de bavure fermé
Il augmente la surface du plan de joint, donc la portance.
Nécessaire pour outillage sur machines à chocs (contact des matrices) (fig. 7.38).
Logement de bavure ouvert
Pour outillage utilisé sur presse, où la course est réglable.

Cordon de matrice

Situé en périphérie de la gravure, il prolonge le logement de bavure pour :
– retenir le matériau qui flue sous l'effet de forgeage ;
– permettre le remplissage de la gravure avant l'écoulement de la matière excédentaire dans le logement de bavure (fig. 7.37 et fig. 7.38).
Sa largeur (4 à 12 mm), et sa faible hauteur (de 1 à 3 mm) provoquent un refroidissement du matériau freinant le passage de la matière jusqu'au remplissage de la gravure (phénomène de frettage).
L'écoulement du métal excédentaire dans la bavure s'effectue sous la pression radiale exercée sur la pièce formée.
Cordon allongé : Pour pièces de faible longueur ou diamètre (*l* ou *D*) et de relative forte épaisseur *h*, avec gorge de ralentissement du fluage (matière supplémentaire à prévoir dans le lopin (fig. 7.39).

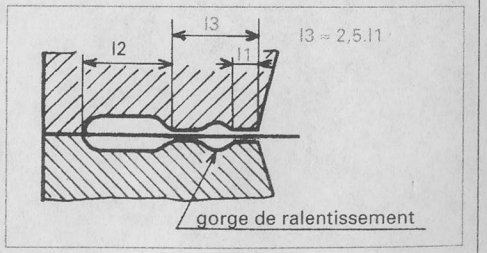


FIGURE 7.39 Cordon de matrice allongé.

Gravures de pièces en U

La bavure centrale, la toile, est importante. Elle comporte un cordon de matrice.
Concevoir des gravures pour produire deux pièces simultanément : réduction de perte de matière (fig. 7.40).

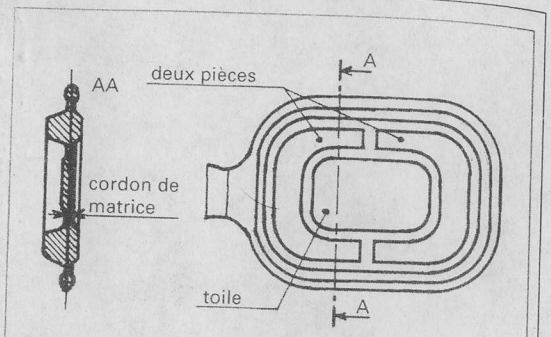


FIGURE 7.40
Estampage simultané de deux pièces identiques avec grande toile.

Pièces en U à ailes courtes et espacées

Procéder au cambrage après roulage de la forme redressée (identique aux pièces cambrées).

Gravures avec nervure ou bossage

Les pièces comportant une nervure ou un bossage nécessitent un fluage important qui limite à une hauteur maximale en fonction du diamètre ou de la largeur de la pièce.
Les rayons de raccordement sont définis en fonction du fluage suivant une courbe logarithmique, en première approximation e et $r \cong 0{,}5\ h$ (fig. 7.41).

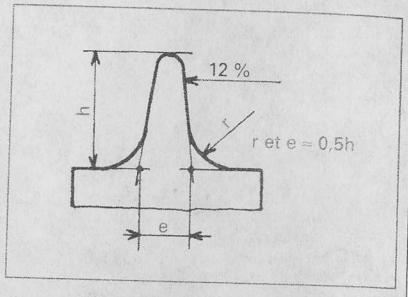


FIGURE 7.41 Raccordement des formes filées.

3.7 Joints de matrices

Le joint des deux matrices constitutives de l'outillage peut être plan, brisé, polyédrique, courbe.

Joint plan

À rechercher ; les deux faces opposées des matrices forment un plan de joint horizontal, perpendiculaire à la direction de frappe.

Joint brisé

Constitué de plans d'inclinaisons différentes selon la forme de pièce à obtenir.

Joint brisé équilibré

Les gravures sont à usiner de sorte que la résultante des efforts de frappe soit parallèle à la direction de frappe (fig. 7.42).

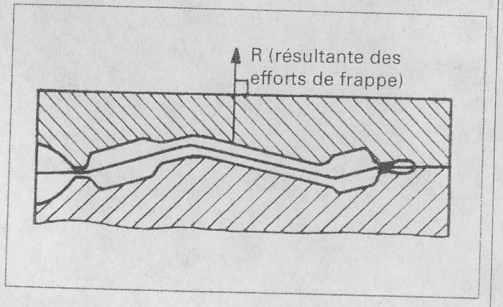


FIGURE 7.42 Joint de matrices brisé équilibré.

La position de la pièce dans les matrices s'obtient en traçant le dynamique des forces appliquées aux CDG des différentes formes.

Joint brisé non équilibré

La pièce ne pouvant être située en position équilibrée dans les matrices (bossages importants...) : prévoir un talon qui s'opposera au glissement latéral (fig. 7.43).

Joints polyédrique et courbe

Aussi facilement usinable que les autres joints, sur les machines-outils à commande numérique 4 ou 5 axes.
Éventuellement prévoir un talon pour s'opposer à un glissement latéral.

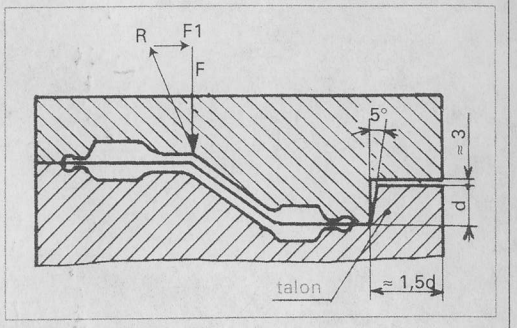


FIGURE 7.43 Joint de matrices brisé non équilibré.

3.8 Dépouilles

Partent du joint de matrices définissant la plus grande surface de la pièce : facilitent le fluage du métal dans les gravures et l'extraction de la pièce estampée (fig. 7.44).
Leur valeur est à considérer dans des plans parallèles à la direction de frappe (incidence dans la conception de matrice à joint brisé).
Elle sera plus importante sur les noyaux : palier le frettage du métal au refroidissement.

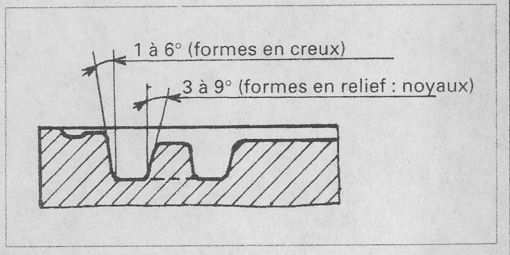


FIGURE 7.44 Dépouilles sur matrice.

Valeurs courantes sur les parois des gravures

Parois des formes en creux, (gravures) :
10 %, soit 6° sur marteaux-pilons ; 5 %, soit 3° sur presses ; 2 %, soit 1° sur machines à forger horizontales.
Parois des formes en relief (noyaux) :
16 %, soit 9° sur pilons ; 10 %, soit 6° sur presses ; 5 %, soit 3° sur machines horizontales.

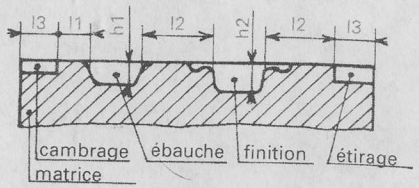
3.9 Surface des plans de joint

Surface entrant en contact en fin de matriçage : surface de frappe.

Matrices pour machines à chocs

Surface du plan de joint, au moins égale à 400 cm^2, pour absorber une énergie de 1 000 daj par impact.

Distance inter-gravures et gravures aux bords extérieurs des matrices : à considérer dans le plan de joint (fig. 7.45).



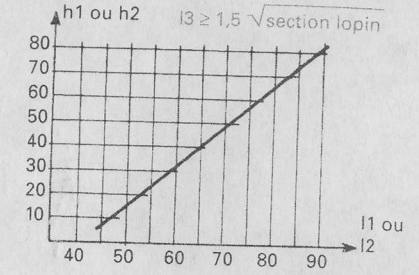


FIGURE 7.45
Distances minimales des empreintes sur matrice pour machines à chocs.

Matrices pour presse

Distances inter-gravures et gravures aux bords extérieurs des matrices ≅ 2/3 distances outillages pour chocs (le plan de joint ne reçoit pas de chocs).

.10 Outillage

a position de la ou des gravures dans les matrices doit permettre l'obtention de la ièce sans déport de matriçage (basculement de la matrice supérieure par non-alignement de l'axe de frappe avec la résultante e réaction du lopin) (fig. 7.46).

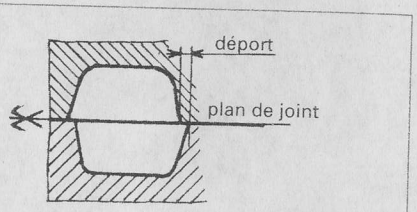


FIGURE 7.46
Risque de déport de matrice.

Couple de matrices ayant une seule gravure

résultante de réaction (de la forme à obtenir) est alignée avec l'axe de frappe.

Couple de matrices ayant plusieurs gravures (ébauche et finition)

xe de frappe passe entre les deux gravures, au plus près de celle de finition (plus important ort de frappe) et au voisinage du centre des blocs.
tiquement, situer la résultante de la gravure de finition à 1/3 de l'entraxe des deux résultes (finition et ébauche) (fig. 7.47).

Conception

matrices doivent être compactes, de fortes sections, maintenues énergiquement sur la chine (queues d'arondes): résistance aux efforts importants ou aux chocs violents . 7.48).

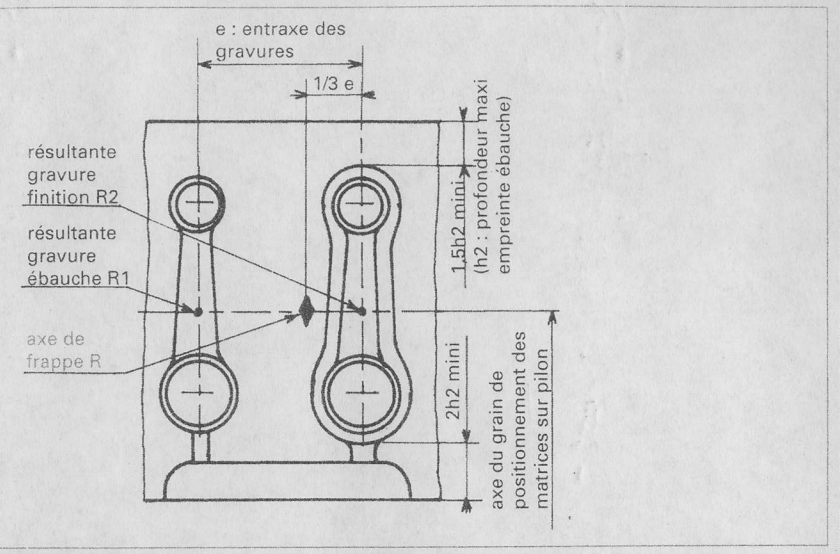


FIGURE 7.47 Axe de frappe des matrices.

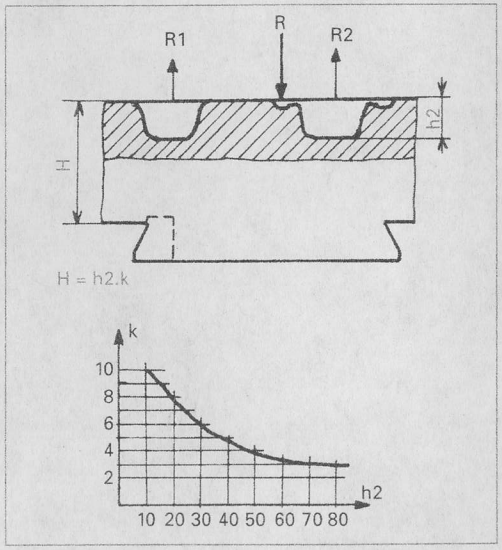


FIGURE 7.48
Hauteur des matrices.

Durée de vie moyenne des matrices : variable selon la difficulté d'obtention des pièces (avant réfection, un outillage peut produire ≅ 10 000 pièces en acier et ≅ 25 000 pièces en alliages d'aluminium ou de cuivre).

Nota : Coût de fabrication d'un outillage de forgeage. À difficulté de pièces égale, sensiblement identique à un outillage métallique de fonderie.

7

Outillage pour presses

Conception modulaire possible (course de frappe réglable, atténuant l'effet de choc).
Chaque élément modulaire porte-gravure est fixé sur un bloc de référence.

Outillage pour machines à chocs (marteau-pilon)

La gravure supérieure contient les formes complexes et conséquentes à obtenir : l'effort de forgeage appliqué en quelques millièmes de seconde, la vitesse d'impact fait monter la matière.

Outillage d'ébavurage

Élimine la bavure par poinçonnage, généralement à chaud, immédiatement après l'estampage.

Toile de débouchure.

À enlever avant l'ébavurage : évite une déformation de la pièce.

Bavure et débouchure.

Peuvent être poinçonnées simultanément avec un même outillage.

Matrices fermées

Pour estamper et matricer sans bavures des pièces non volumineuses, en production de grande série.
Le lopin est défini et débité avec une précision suffisante.

Outillage de calibrage à froid

Pour obtenir une dimension relativement précise (IT ≅ 0,2 mm) sur une forme généralement épaisse : écrasement de la pièce estampée sous deux enclumes.
L'effort provoque le dépassement de la limite élastique du matériau (retour élastique Δe = épaisseur de la pièce × limite d'élasticité/module d'élasticité).
Prévoir une surépaisseur par face calibrée de ≅ 0,4 mm, à l'estampage finition.

Outillage de redressage à froid

Pour redresser des pièces estampées ayant une flèche hors tolérance : pièces longues et peu épaisses, avec débouchure.
Deux enclumes, évidées en alternance, provoquent les déformations de redressage (avec dépassement de la limite élastique).

Matrice comportant des noyaux

Pour estampage intérieur (forme en relief dans les gravures) avec subsistance d'une toile dans la pièce estampée : hauteur limite pour non-contact entre deux noyaux opposés ou noyau et gravure opposée (fig. 7.49).

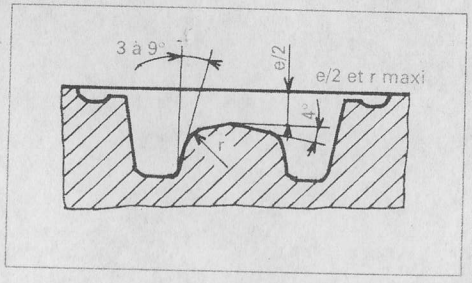


FIGURE 7.49 Forme des noyaux.

Matériaux pour outillages

Ils doivent résister à la chaleur et aux chocs (en particulier sur les marteaux-pilons).
Utilisation courante : marteaux-pilons, 55 NCD 16 ; presses (verticales) Z38 CD 5 ; machines à forger horizontales, 45 NC 17.

4. Estampage horizontal

4.1 Généralités

Opération s'effectuant par refoulement sur presses horizontales à forger, en production de grande série de pièces terminées « brut de forge » (sans reprise ultérieure) à partir de barres ou de lopins de section généralement cylindrique (fig. 7.50).
La barre ou le lopin, énergiquement maintenu entre les deux matrices, est estampé à une extrémité par un poinçon plein ou creux (bouterolle).
L'extraction de la pièce estampée est obtenue par ouverture de l'outillage (une machine étant mobile).

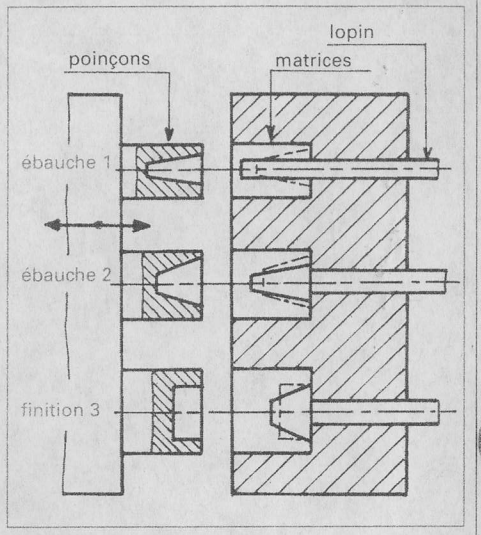


FIGURE 7.50
Schéma d'opérations d'estampage horizontal.

4.2 Matrices

Comportent, pour chaque opération, l'alésage de maintien du brut et le logement de la forme à obtenir (avec guidage du poinçon) (fig. 7.50 et 7.51).
Le dépassement de la barre ou du lopin correspond au volume de la forme à obtenir par estampage.
Pour chacune des opérations successives d'un outillage, toute la matière en dépassement est « travaillée ».

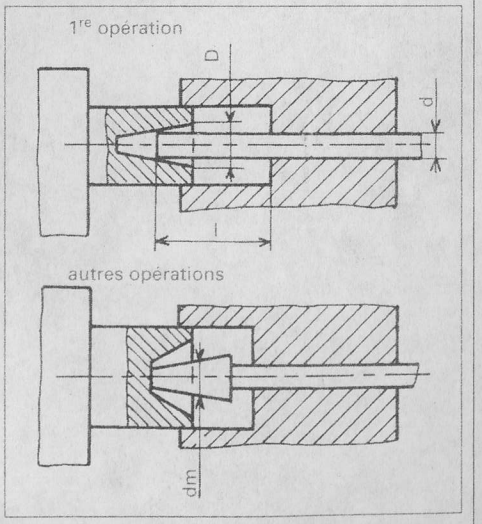


FIGURE 7.51
Dépassements de pièce dans les matrices.

Dépassement maximal par opération

Longueur pratique, pour éviter le flambage, l = 2,5 diamètres de lopin (1re opération) ou diamètre moyen d'ébauche (autres opérations) (fig. 7.51). Pièces nécessitant un excellent fibrage, l = 1,5 diamètre de lopin ou moyeu.
Pièces avec faible différence des diamètres lopin et forme à obtenir (rapport maxi 1,5) : l possible = 3,5 diamètres de lopin ou moyeu.

Dépassement important pour produire une pièce

Plusieurs opérations successives sont nécessaires.
Le nombre d'opérations se détermine comme un estampage vertical, en fonction du taux de réduction R %.

4.3 Bavure d'estampage

Très peu importante. L'ébavurage ne nécessite pas d'outillage spécifique.
À effectuer en phase d'usinage (tournage ébauche).

4.4 Mise en œuvre

Estampage épaulement grand diamètre

Importante quantité de matière à former.
À effectuer en plusieurs opérations avec bouterolles produisant des troncs de cône successifs (évitant le flambage et assurant l'homogénéité du matériau).
Première bouterolle. Sa conicité varie en fonction de la longueur du brut à refouler (fig. 7.51).
On admet D = 1,5 d pour $l \geq 3\ d$ à D = 1,2 d pour $l \cong 10$ d, avec D = grand diamètre du cône de bouterolle ; d = diamètre du brut (petit diamètre du cône).

Estampage de trous

S'obtient avec un outil poinçon appointé, produisant le fluage périphérique.
Poinçon. Angle de pointe 60° : formage profond (2,5 diamètres du poinçon en une opération) (fig. 7.52).

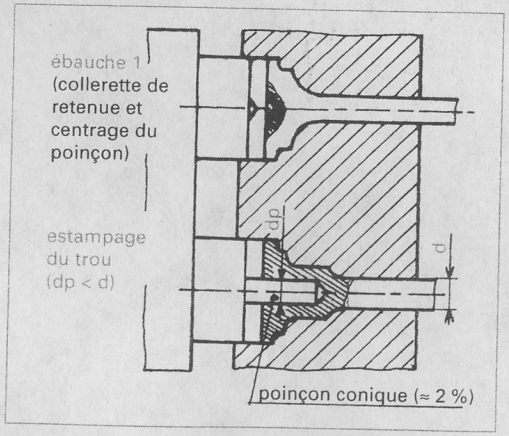


FIGURE 7.52
Schéma d'opérations d'estampage horizontal d'une forme tubulaire.

Diamètre poinçon < diamètre de la barre, de préférence.
Maintien de la barre. Par une collerette de retenue, avec avant-trou de départ de poinçon (obtenue par estampage).
Collerette de la forme du produit fini ou à éliminer (par usinage) (fig. 7.52).

Estampage à déboucher

Pour séparer la pièce du brut (barre), utiliser des diamètres poinçon et barre identiques.

Logement de matrice

Pour limiter l'effort du poinçon à l'expansion annulaire du matériau : aire de la section de matrice (Ø D) = S sections barre (Ø d) et poinçon (Ø dp), soit $D^2 = d^2 + dp^2$.

4.5 Pièces obtenues

Elles ne comportent pas de dépouille et sont fibrées annulairement, sans risque de criques.

4.6 Utilisation

Très utilisé, en production de grande série de pièces « brut de forge », type cylindrique (arbres, pignons, boulonnerie...) pleines ou creuses.
Des formes de section non cylindrique peuvent être obtenues, éventuellement.

5. Formage à chaud

5.1 Généralités

Certains types de pièces sont produits par formage à chaud, selon une opération de forgeage spécifique (bigornage et rétreinte) et des procédés de formage (filage, fluotournage...).

5.2 Bigornage ou laminage circulaire

Obtention sur machine spécifique de bagues à partir d'ébauches cylindriques plates poinçonnées préalablement en estampage (fig. 7.53).

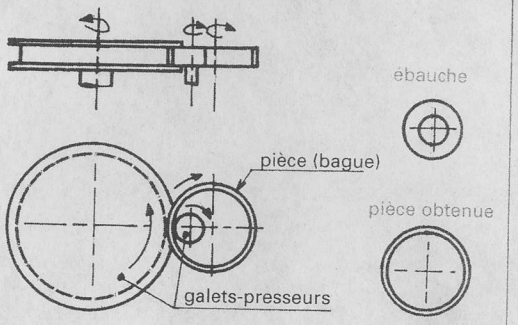


FIGURE 7.53
Schéma de principe du laminage circulaire.

Utilisation

Production en grande série de bagues fibrées de petit à grand diamètres (au-delà du mètre) sans perte de matière.

5.3 Rétreinte

Obtention, sur machine spécifique à rétreindre, de pièces cylindriques épaulées pleines et creuses, à partir d'ébauches cylindriques (pleines ou tubulaires) (fig. 7.54).

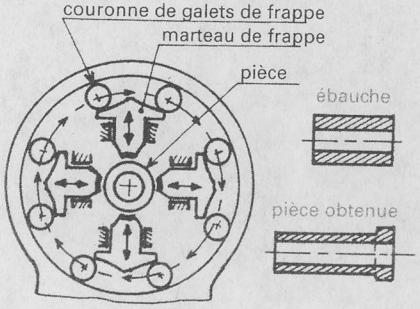


FIGURE 7.54
Schéma de principe de rétreinte pièces cylindriques.

Utilisation

Production en grande série (temps très court, une à quelques minutes) de pièces fibrées, sans perte de matière.

5.4 Filage à chaud

Procédé analogue au filage à froid (extrusion, chapitre « procédés de formage »).
Le matériau chauffé flue plus aisément dans la filière (fig. 7.55).

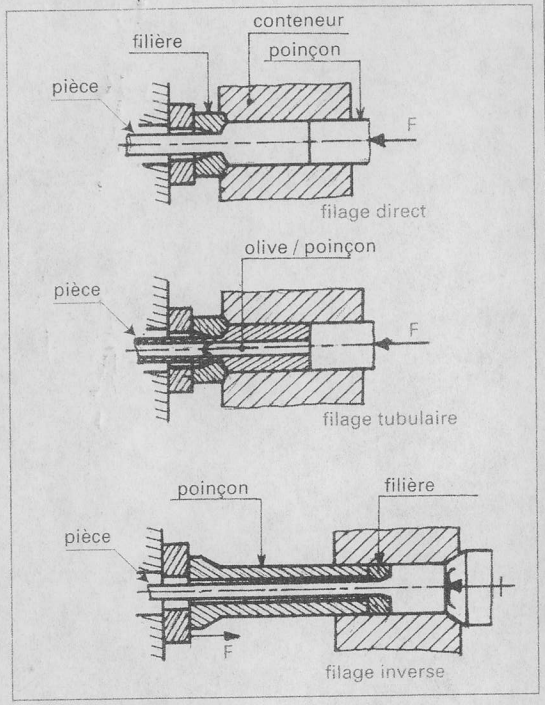


FIGURE 7.55
Schéma de principe du filage à chaud.

Utilisation

Production de pièces cylindriques longues, pleines ou tubulaires.

5.5 Fluotournage à chaud

Procédé analogue au fluotournage à froid (chapitre « procédés de formage »).
Le matériau chauffé flue sous la pression du galet-presseur (fig. 7.56).

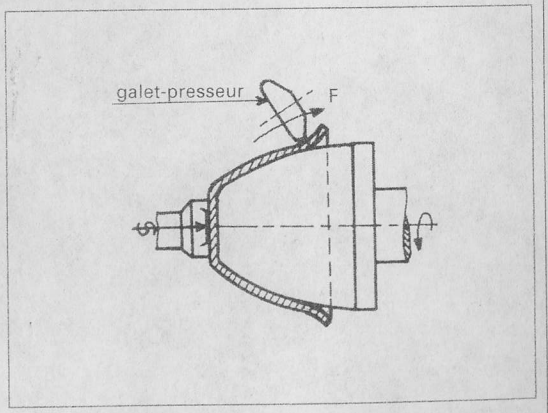


FIGURE 7.56
Schéma de principe du fluotournage à chaud.

Utilisation

Production de pièces cylindriques creuses, d'épaisseur non constante.

8 PROCÉDÉS DE FORMAGE

1. Généralités 227
   1.1 Les différents procédés de formage 227
2. Formage par emboutissage 227
   2.1 Généralités 227
   2.2 Détermination des flans 228
   2.3 Emboutissage cylindrique 230
   2.4 Emboutissage avec collerette 231
   2.5 Emboutissage de contre-emboutis 232
   2.6 Emboutissage des collets 233
   2.7 Emboutissage tronconique 234
   2.8 Emboutissage hémisphérique et similaire 235
   2.9 Emboutissage prismatique 236
   2.10 Calibrage d'emboutis 237
   2.11 Détourage d'emboutis 237
   2.12 Outillages sans serre-flan 238
   2.13 Outillages avec serre-flan 238
   2.14 Conception des outillages 239
   2.15 Outillages combinés 241
3. Formage par pliage 243
   3.1 Généralités 243
   3.2 Détermination du flan 243
   3.3 Effort de pliage 244
   3.4 Matériaux utilisés 245
   3.5 Pliage en l'air 245
   3.6 Pliage en matrice 246
   3.7 Outillages de pliage 248
   3.8 Presses-plieuses 249

4. Formage par extrusion 250
4.1 Généralités 250
4.2 Filage direct ou avant 250
4.3 Filage inverse ou arrière 250
4.4 Filage latéral 250
4.5 Refoulage 251
4.6 Écrasage 251
4.7 Étirage 251
4.8 Caractéristiques des pièces 252
4.9 Réduction de diamètre des lopins au filage 252
4.10 Longueur filée par opération 253
4.11 Matériaux filés 253
4.12 Mise en œuvre 253
4.13 Outillage de filage direct 253
4.14 Outillage de filage inverse 254
4.15 Effort d'extrusion 254
4.16 Outillage hydrostatique d'étirage 255
4.17 Tréfilage 255
4.18 Utilisation de l'extrusion 255
5. Formage par fluotournage 255
5.1 Généralités 256
5.2 Formes cylindriques 256
5.3 Formes coniques et curvilignes 256
5.4 Outils-molettes 256
5.5 Matériaux utilisés 257
5.6 Précisions obtenues 258
5.7 Utilisation 258
6. Formage sous haute énergie 258
6.1 Généralités 258
6.2 Formage électro-hydraulique 258
6.3 Formage par électromagnétisme 259
6.4 Formage par explosion 259
7. Cintrage 260
7.1 Généralités 261
7.2 Cintrages des tôles 261
7.3 Cintrage des tubes et des profilés 261
7.4 Pliages des profilés 263
8. Profilage à froid 265
8.1 Généralités 266
8.2 Galets de profilage 266
8.3 Matériaux utilisés 266
8.4 Précisions obtenues 267
8.5 Machines 267
8.6 Utilisation 267

1. Généralités

Production de pièces métalliques relativement peu épaisses, en série, souvent très grandes, par déformation plastique du matériau, à partir de bruts, principalement en feuilles, en lopins, en bandes.

- Le choix d'un procédé de formage est fonction du type de pièces à produire, ce qui conditionne le brut nécessaire.
- La quantité à produire conditionne l'outillage plus ou moins optimisé, pour les pièces dont le brut est obtenu à partir de flans découpés dans la feuille de tôle métallique.
- Les dimensions et la forme du brut sont conditionnées, avec le procédé, par le type de pièces à obtenir.

1.1 Les différents procédés de formage

- Formage par emboutissage, à partir de flans métalliques.
- Formage par pliage, à partir de flans ou de bandes métalliques.
- Formage par extrusion, à partir de lopins métalliques.
- Formage par fluotournage, à partir de lopins métalliques.
- Formage sous haute énergie, à partir de flans épais et généralement de grandes dimensions.
- Formage par profilage à froid, à partir d'une bande métallique.
- Formage par cintrage, à partir de tubes, profilés et tôles.
- Formage par laminage, à partir de bruts en tôles épaisses et de lingots métalliques issus de fonderie.

2. Formage par emboutissage

2.1 Généralités

Déformation plastique d'un flan dans une matrice de forme sous l'action d'un poinçon qui produit une forme creuse d'épaisseur théoriquement constante et égale à celle du flan (fig. 8.1).

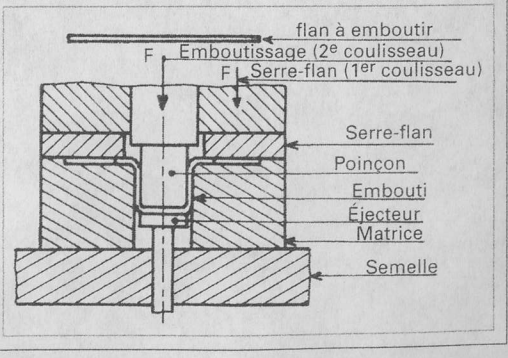
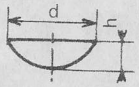


FIGURE 8.1
Schéma d'emboutissage sur presse à double effet.

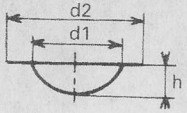
Opération effectuée à froid ou à chaud, suivant l'épaisseur du flan et la forme à obtenir.
Le flan est transformé par déplacement moléculaire du matériau, de façon irréversible (la pièce emboutie n'est pas développable).
Opposition à la formation de plis causée par le déplacement radial du matériau, à l'aide d'un serre-flan qui maintient le flan durant l'emboutissage d'embouts profonds (laminage du matériau entre poinçon et matrice).
La précision dimensionnelle des pièces obtenues est de qualité 10 à 8.
Les matériaux employés doivent avoir un grand allongement (A % > 30).
La déformation permanente du flan pouvant être très importante, le matériau est écroui (plus dur, plus fragile, % d'allongement diminué).

2.2 Détermination des flans

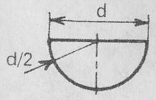
À partir de la fibre moyenne.
Considérer que l'embouti a la même surface que le flan, son épaisseur ayant théoriquement une épaisseur constante.
Augmenter de 2 à 4 mm le diamètre du flan pour effectuer un détourage du bord supérieur de la pièce.
Rayon r de raccordement paroi/fond. À négliger, inférieur au dixième du diamètre de la pièce à obtenir ($r \leq d/10$).
Déterminer le flan théorique. Son diamètre D pour les pièces à emboutir (en majorité cylindriques) avec des formules établies analytiquement (fig. 8.2).



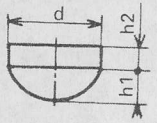
$D = \sqrt{d^2 + 4h^2}$



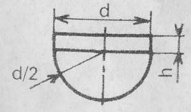
$D = \sqrt{d_2^2 + 4h^2}$



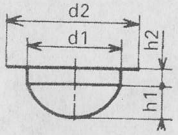
$D = \sqrt{2d^2}$ ou $1{,}1414d$



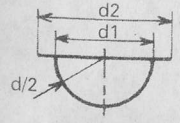
$D = \sqrt{d^2 + 4(h_1^2 + dh_2)}$



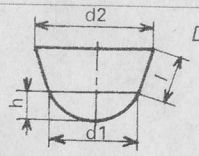
$D = \sqrt{2d^2 + 4dh}$
ou $1{,}1414\sqrt{d^2 + 2dh}$



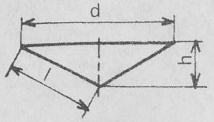
$D = \sqrt{d_2^2 + 4(h_1^2 + d_1 \cdot h_2)}$



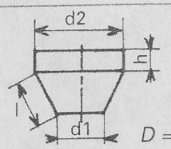
$D = \sqrt{d_2^2 + d_1^2}$



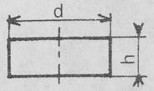
$D = \sqrt{d_1^2 + 4h^2 + 2l\,(d_2 + d_1)}$



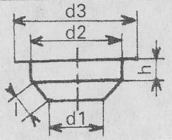
$D = \sqrt{2d \cdot l}$



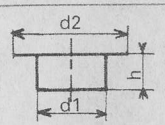
$D = \sqrt{d_1^2 + 2[l\,(d_1 + d_2) + 2d_2 h]}$



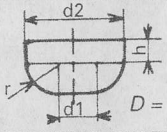
$D = \sqrt{d^2 + 4dh}$



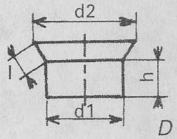
$D = \sqrt{d_1^2 + 2l\,(d_1 + d_2) + 4d_2\,h + d_3^2 - d_2^2}$



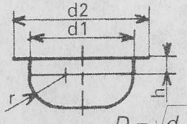
$D = \sqrt{d_2^2 + 4d_1 \cdot h}$



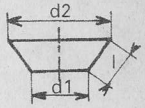
$D = \sqrt{d_1^2 + 2[l\,(d_1 + d_2) + 2d_2 h]}$



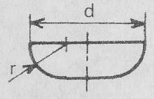
$D = \sqrt{d_1^2 + 4d_1 \cdot h + 2l\,(d_1 + d_2)}$



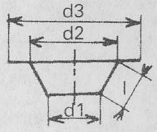
$D = \sqrt{d_2^2 + 4d_1\,(0{,}57r + h) - 0{,}39r^2}$



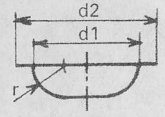
$D = \sqrt{d_1^2 + 2l\,(d_1 + d_2)}$



$D = \sqrt{(d - 2r)^2 + 2\pi r\,(d - 0{,}7r)}$



$D = \sqrt{d_1^2 + 2l\,(d_1 + d_2) + d_3^2 - d_2^2}$



$D = \sqrt{d_2^2 + 2{,}28r\,d_1 - 0{,}39r^2}$

FIGURE 8.2 Formules de calcul du diamètre de flan (formes simples).

Détermination diamètre D du flan. Pour une pièce de forme donnée, utiliser le théorème de Guldin, soit $r^2 = 2R \cdot \sum l$, (avec r = rayon du flan).
r pourra être obtenu par la méthode de traçage du polygone funiculaire : résolution des différents cas possibles, tout en considérant, le cas échéant, les rayons de raccordement, soit :
– décomposer le demi-profil en éléments simples (droites, cercles) ;
– construire graphiquement l'axe de ce profil passant par son CdG (dynamique et funiculaire) ;
pour obtenir rm = $\frac{\sum ri \cdot li}{\sum li}$; et dans le triangle rectangle inscrit dans un demi-cercle de diamètre : $L = \sum li + 2\,rm$;
d'où $\frac{2\,rm}{D/2} = \frac{D/2}{\sum L}$, soit $D = \sqrt{8 \cdot \sum(ri \cdot Li)}$ (fig. 8.3).

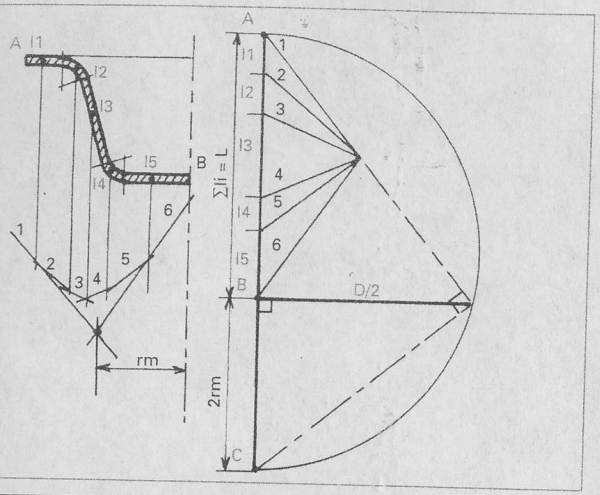


FIGURE 8.3
Détermination graphique du diamètre d'un flan.

2.3 Emboutissage cylindrique

S'effectue sans difficultés, dans les limites des contraintes créées par le matériau et la forme finale de l'embouti, la pièce.
La couronne définissable sur le flan entre les diamètres poinçon-flan offre une résistance à la déformation, par des contraintes internes de compression (fibres raccourcies) et de traction (fibres allongées) dans le matériau (fig. 8.4).
Ces contraintes internes doivent être inférieures à la résistance à la rupture par traction *Rm* de la couronne – à emboutir – appelée section motrice, sinon il y aurait déchirure du flan: plusieurs passes d'emboutissage peuvent être nécessaires.

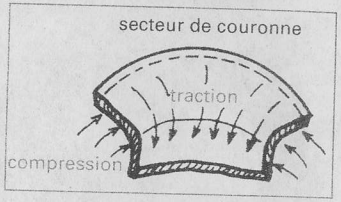


FIGURE 8.4 Contraintes dans la couronne à l'emboutissage.

Diamètre d'emboutissage limite *dn*

Déterminé avec le coefficient de réduction *k* établi expérimentalement et le diamètre *D* du flan, ou de la couronne dn de la passe précédente (fig. 8.5).

Diamètre d'emboutissage limite de la première passe

$d_1 = D \cdot k_1$, permettant de vérifier si une passe est suffisante pour former la pièce.

Diamètre des passes d'emboutissage suivantes

$dn = d\,(n-1) \cdot k_2$.

Rayons des emboutis

Rayon intérieur du fond de la pièce

Doit être au moins égal à l'épaisseur du flan.

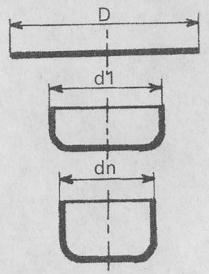


FIGURE 8.5
Coefficient de réduction de matériaux d'emboutissage.

Matériaux	k1	k2
Acier d'emboutissage		
- ordinaire	0,60	0,80
- spécial	0,54	0,75
Acier inoxydable		
- austénitique	0,52	0,80
- ferrique	0,58	0,80
Aluminium (recuit)	0,55	0,80
Duralumin (recuit)	0,55	0,90
Laiton	0,55	0,75
Cuivre	0,60	0,85

Rayons r de raccordement

Facilitent l'emboutissage avec $r \geq 5e$ avec e = épaisseur du flan (fig. 8.6).

Hauteurs des emboutis

Hauteur considérée comme idéale $h \leq$ diamètre de l'embouti par passe (fig. 8.6).

Hauteur maximale h de l'embouti

Varie selon les matériaux avec un maximum, sans recuit inter-passes, en fonction du diamètre d'embouti *d* à obtenir, soit $h = d \cdot a$,
avec *a* : aciers d'emboutissage $\simeq 4$;
alliages d'aluminium $\simeq 5$;
cuivre, laiton et zinc $\simeq 8$.

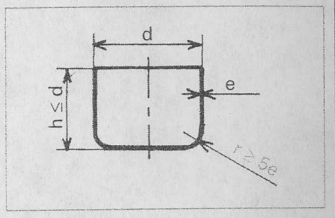


FIGURE 8.6 Hauteur limite et rayon de raccordement des emboutis cylindriques.

Recuit

Rend au matériau ses propriétés après écrouissage.
À effectuer au plus tôt après la passe d'emboutissage.

2.4 Emboutissage avec collerette

Former la collerette à son diamètre extérieur dès sa première passe (ce diamètre ne peut pas être modifié après sa réalisation) (fig. 8.7).
La dernière passe doit conformer la forme emboutie.

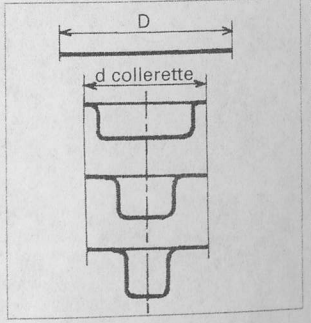


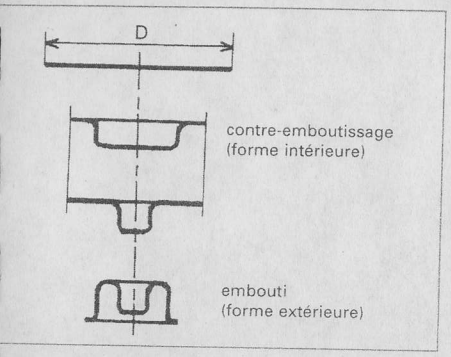
FIGURE 8.7
Emboutissage d'une pièce avec collerette.

2.5 Emboutissage de contre-emboutis

Forme située au centre d'une pièce emboutie, obtenue, en règle générale, avant l'embouti extérieur, suivant les mêmes conditions que l'emboutissage cylindrique.
Méthode nécessaire pour les contre-emboutis profonds (fig. 8.8).

Contre-embouti peu profond

Peut être formé avec le même outillage qui produit l'embouti-extérieur, par allongement du fond de pièce, en fin de course d'emboutissage (fig. 8.9).
Méthode limitée par l'allongement admissible du matériau et la possibilité de réduire l'épaisseur du fond de pièce.



GURE 8.8 Emboutissage d'une pièce avec contre-bouti profond.

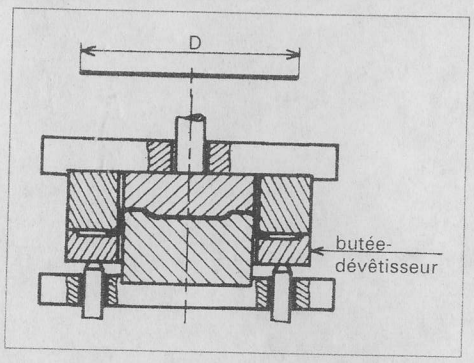


FIGURE 8.9 Schéma d'outillage d'emboutissage avec contre-embouti peu profond.

Contre-embouti sans réduction d'épaisseur

e profondeur $h \leq d/2$, avec d = diamètre du ntre-embouti.
fectuer une première passe de renvoi d'une sse, d'un diamètre de fond égal à celui du ntre-embouti (fig. 8.10).
seconde passe, l'emboutissage des deux rmes, nécessite de grands rayons d'ou- age poinçon-matrice ≃ 5 épaisseurs du n.

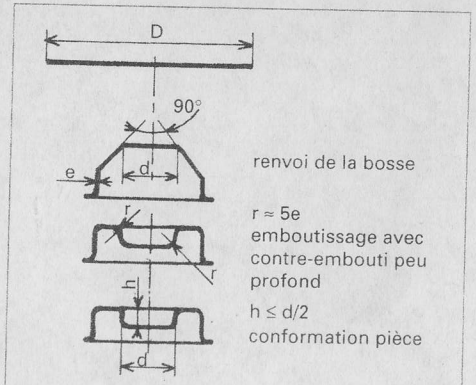


FIGURE 8.10
Emboutissage d'une pièce avec contre-embouti d'épaisseur constante.

Contre-embouti débouchant

rmé après poinçonnage préalable d'un trou central au diamètre inférieur à celui de la ouchure.
deux emboutis sont ensuite formés avec le même outillage, et la débouchure est ensuite nçonnée à son diamètre (fig. 8.11).

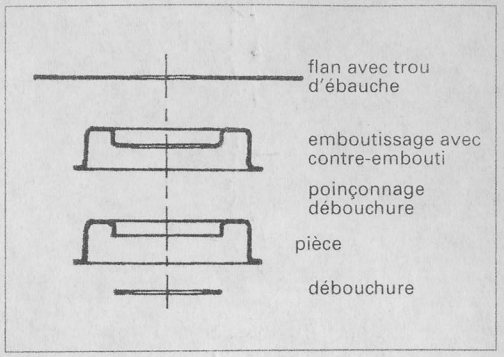


FIGURE 8.11
Emboutissage d'une pièce avec contre-embouti débouchant.

2.6 Emboutissage des collets

Ils sont formés par emboutissage d'un flan préalablement poinçonné en son centre à un diamètre déterminé (fig. 8.12).
Le diamètre de poinçonnage d_2 est fonction du diamètre du collet d et de sa hauteur h, sous la condition : $\sqrt{d^2 - 4d \cdot h} < d_2 < d - 2h$, avec $h \leq d/2$.
(A/A + 100) mesuré à la fibre neutre et qui est fonction de la limite d'allongement A % du matériau.
Opposition à la formation de criques : effectuer l'emboutissage en sens inverse du poinçonnage.

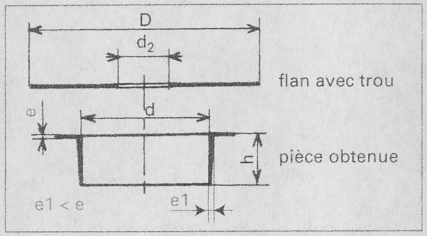


FIGURE 8.12 Emboutissage d'une pièce avec collet.

Emboutissage d'un collet haut (supérieur à la hauteur maximale *h*)

Il est formé en trois passes : emboutissage d'une coupelle au diamètre d du collet ; poinçonnage du fond au diamètre $d2 \simeq 0{,}5\ d$; emboutissage du fond à la hauteur finale h (fig. 8.13).
L'épaisseur du collet est réduite à ≃ 3/4 e (e = épaisseur du flan).

Nota : Les pièces embouties avec collet permettent de remplacer, à condition mécanique égale, des pièces épaulées obtenues par tournage.

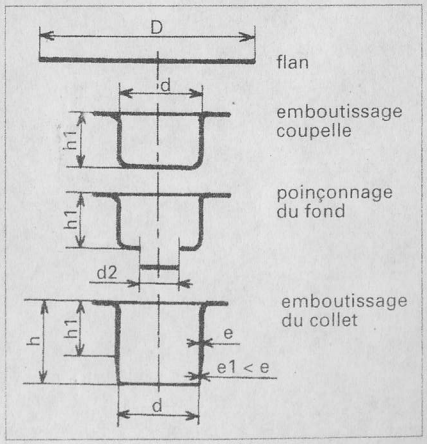


FIGURE 8.13 Emboutissage d'une pièce avec collet haut.

Soyage

Opération de poinçonnage d'un trou suivi de l'emboutissage : en une passe (outil épaulé) ; en deux passes avant un taraudage (collets de petit diamètre) (fig. 8.14).

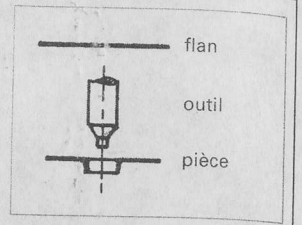


FIGURE 8.14
Soyage d'un collet de petit diamètre.

2.7 Emboutissage tronconique

Il est obtenu dans les mêmes conditions que les emboutis cylindriques, dans la limite expérimentale : différence des diamètres maxi d et mini d_1 du tronc de cône, $d - d_1 \leq 20\,e$ (avec e = épaisseur du flan) (fig. 8.15).

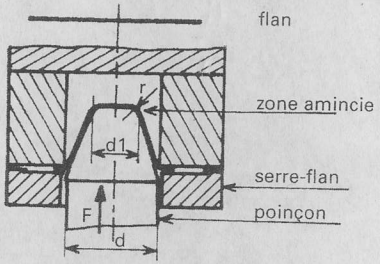


FIGURE 8.15 Schéma d'emboutissage tronconique.

Emboutis avec $d - d_1 > 20e$ ou angle du cône < 80°

Formés en plusieurs passes d'emboutissage cylindrique formant l'ébauche et une passe de finition (calibrage).

Évite la formation de plis sur la partie inférieure du cône et d'éventuelles fissures dans la zone amincie (fig. 8.16).

Diamètres des passes successives. À déterminer selon le coefficient de réduction d'un embouti.

Les hauteurs relatives hn (intersection profils pièce/passe n) à définir avec débordement extérieur du profil-pièce $\simeq 10e$, avec de grands rayons de raccordement (8 à 10e) (fig. 8.17).

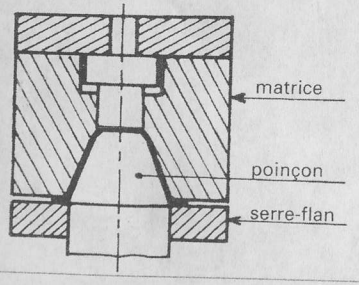


FIGURE 8.16 Schéma d'outillage de calibrage d'un embouti tronconique profond avec cône < 80°.

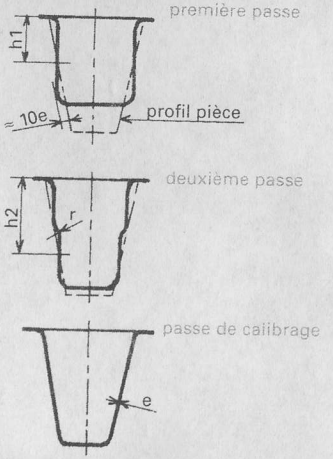


FIGURE 8.17
Passes d'emboutissage d'une pièce tronconique avec cône < 80°.

Rayons de raccordement du poinçon et de la matrice

Valeur maximale (10 e), en particulier sur le poinçon (fissures à éviter sur l'embouti).

2.8 Emboutissage hémisphérique et similaire

Ils sont obtenus dans les mêmes conditions que les emboutis tronconiques.
La calotte sphérique, jusqu'à la demi-sphère, est réalisable en une passe à la condition d/e < 200 (avec d = diamètre du poinçon ; e = épaisseur du flan) (fig. 8.18).

Calotte sphérique avec d/e > 200.

Plusieurs passes sont nécessaires.
Les poinçons successifs ont leur rayon de courbure R identique à celui de la pièce finie.
Diamètres des poinçons successifs (fig. 8.19).
– première passe : $d = 2\,(R.\cos.\,45° + 10e)$
– passes suivantes : $dn = d_{n-1} + 20e$.
Le rayon rm de la matrice sera au moins égal à dix épaisseurs du flan : assurer le parfait emboutissage.

Formes similaires (elliptique, parabolique)

Le diamètre du poinçon d'emboutissage est défini à partir de l'intersection de cercles de construction, point de départ de 10e, à mesurer sur épure (fig. 8.20).

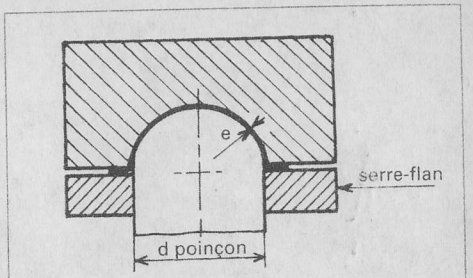


FIGURE 8.18 Schéma d'outillage d'emboutissage de pièces hémisphériques avec d/e < 200.

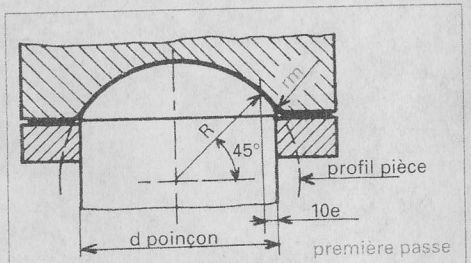


FIGURE 8.19 Emboutissage de pièces hémisphériques avec d/e > 200.

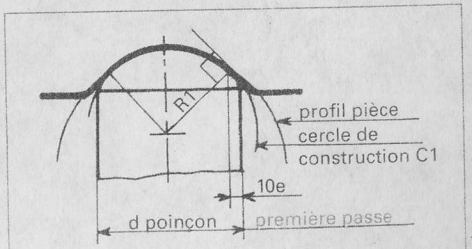


FIGURE 8.20 Emboutissage d'une forme elliptique (première passe).

8

2.9 Emboutissage prismatique

Obtention simultanée des côtés par pliage et des raccordements par emboutissage (fig. 8.21).

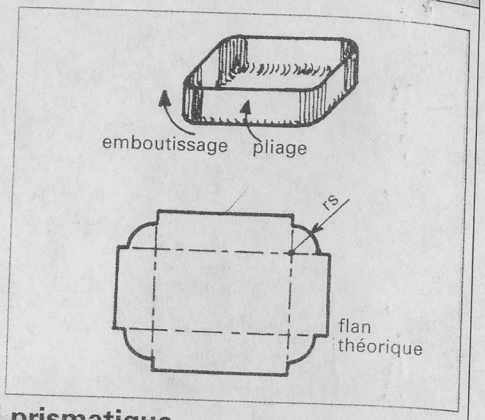


FIGURE 8.21
Embouti prismatique et son développement théorique.

Flan d'embouti prismatique

Le flan théorique correspond : au fond ; au développement des côtés ; à quatre secteurs de 90° d'une hauteur inférieure à celle des côtés (à déterminer par égalité des surfaces) (fig. 8.22).
Rayon d'un secteur $rs = \sqrt{S1.(4/\pi)}$.

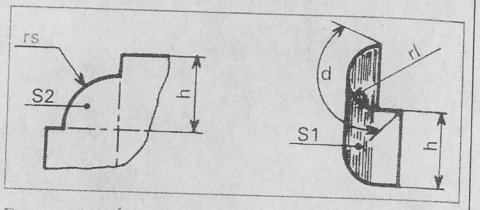


FIGURE 8.22 Éléments de calcul des secteurs de raccordement des côtés.

Surface du raccordement latéral S_1

S_1 = 1/4 surface du secteur S_2.
$S_1 = d \cdot h = h\ (\pi \cdot rl/2)$ et $S_2 = \pi \cdot R^2 s/4$ d'où rs (fig. 8.22) ; avec h, hauteur de l'embouti = $d = 2\ \pi\ rl/4$.
Surface du flan théorique à modifier en un flan pratique : glissement latéral du matériau. Des essais préliminaires d'emboutissage permettent de définir ce flan pratique selon la hauteur des pièces.

Emboutis prismatiques obtenus en une passe

Ils sont formés en une passe aux deux conditions suivantes :
– $h \leq 6\ rl$, avec rl rayon latéral de l'embouti
– un embouti cylindrique inscriptible dans la pièce doit pouvoir être formé en une seule passe (fig. 8.23).

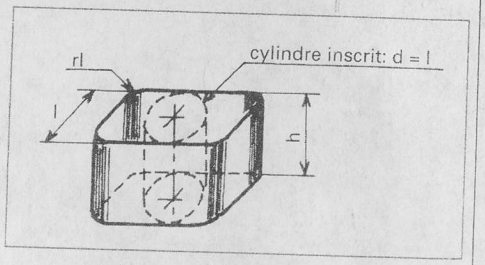


FIGURE 8.23 Éléments de limite d'emboutissage en une passe des emboutis prismatiques.

Emboutis prismatiques obtenus en plusieurs passes

La section limite Sn des poinçons successifs se détermine à l'aide du coefficient de réduction k_2 (on considère une surface), soit : $S_1 = S_0 \cdot k_1^2$; $Sn \geq S_{(n-1)} \cdot k_n$, (avec S_0 = section du flan).

Emboutis dissymétriques et de grandes dimensions

Pallier une éventuelle formation de plis, en plaçant un jonc – ou plusieurs éventuellement – de retour du flan, sur la matrice ou le serre-flan (fig. 8.24).

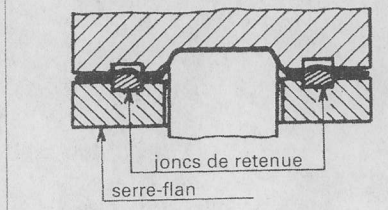


FIGURE 8.24
Joncs de retenue sur outillage d'emboutissage prismatique.

2.10 Calibrage d'emboutis

Appelé également conformation ou frappe, permet, si nécessaire, de former complètement la pièce : mise en hauteur exacte de la pièce ; réduction des rayons de raccordement ; planage de la collerette (fig. 8.25).

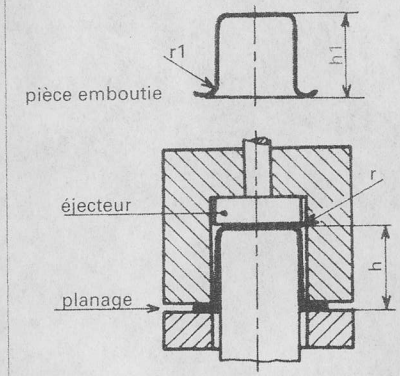


FIGURE 8.25
Schéma d'outillage de calibrage d'un embouti.

2.11 Détourage d'emboutis

Découpe du contour extérieur de la pièce emboutie, en une passe suivant un profil précis, avec un outillage spécifique (fig. 8.26).

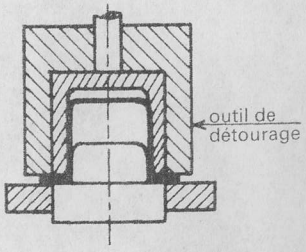


FIGURE 8.26
Schéma d'outillage de détourage d'un embouti.

12 Outillages sans serre-flan

a remontée du poinçon, un décrocheur tient la pièce qui s'évacue par le dessous l'outillage en passant au travers de la trice (fig. 8.27).

Décrocheurs

sont ponctuels (flans épais) ou annulaires plusieurs secteurs (pour flans minces, évint de marquer la pièce) (fig. 8.28).

Utilisation

mage d'emboutis dont la différence des mètres flan D et emboutis d est $D - d \leq 20e$ vec e = épaisseur du flan) : résorption des d'emboutissage.

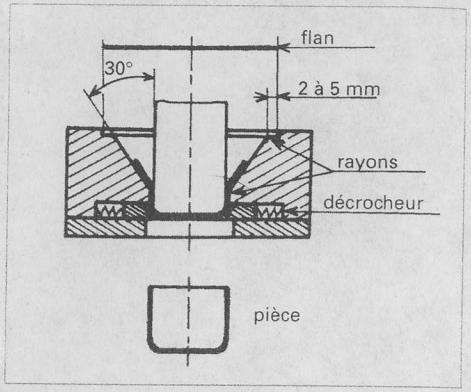


FIGURE 8.27 Schéma d'outillage d'emboutissage sans serre-flan.

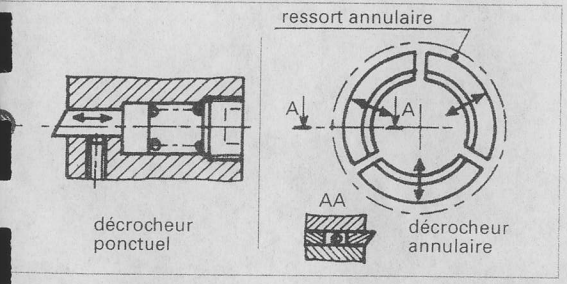


FIGURE 8.28 Décrocheurs d'emboutis.

13 Outillages avec serre-flan

éjecteur intégré à la matrice évacue la e par le haut (fig. 8.29).
sse utilisée : pour l'emboutissage de ites pièces, elle peut être à simple effet.

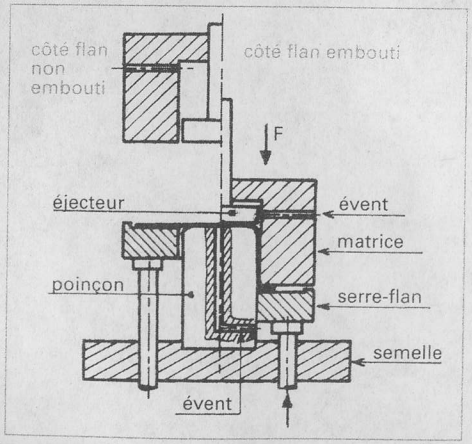


FIGURE 8.29
Outillage d'emboutissage avec serre-flan.

Outillage pour plusieurs passes

Serre-flan et matrice ont un rayon d'entrée $r_{en} = (d_{n-1} - d_n)/2$.
Passes relativement nombreuses. Celles intermédiaires à la première et à la dernière ont leur rayon d'entrée remplacé par un cône d'entrée (40 à 45°) sur serre-flan, matrice et poinçon : facilite la continuité d'épaisseur de l'embouti et augmente la surface d'appui du serre-flan (fig. 8.30).

Presses utilisées

À simple effet.
Poinçon sur la table avec le serre-flan qui est actionné plus facilement (guidage assuré par chandelles) (fig. 8.29).
À double effet.
Matrice sur la table : le double effet, par le mouvement du premier coulisseau, actionne le serre-flan ; le deuxième coulisseau, à l'intérieur du premier, actionne le poinçon (fig. 8.1).

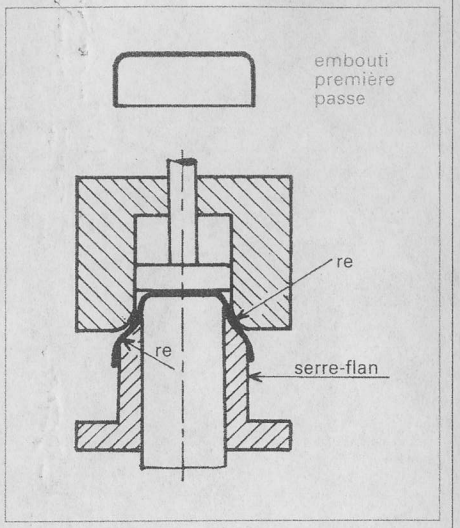


FIGURE 8.30 Schéma d'outillage d'emboutissage en plusieurs passes.

2.14 Conception des outillages

Semelle, matrice et serre-flan doivent être de forte épaisseur.
Déterminer les dimensions relatives des éléments (matrice, poinçon, serre-flan) en fonction de l'embouti à produire (fig. 8.31).
Distance de sécurité fin de course d'outil : 5 à 15 mm entre serre-flan et éjecteur.
Positionnement du flan ou de l'embouti (pièce obtenue en plusieurs passes) : petites pièces, par drageoirs ; grandes pièces par trous pilotes (sur zone ajourée en dernière passe).

Surfaces fonctionnelles (poinçon, matrice, serre-flan)

Elles sont rectifiées et rodées, afin de favoriser le glissement du flan, et résistantes à l'usure (dureté HRc ≃ 60).
Hauteur calibrante de la matrice : d'une valeur moyenne de $5e$.

Rayons de raccordement

Sur le poinçon et la matrice (d'entrée r_e, de calibrage r_c) = $5e$ en moyenne.

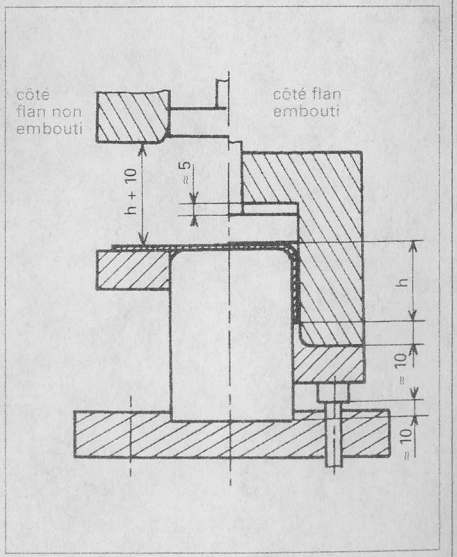


FIGURE 8.31 Jeux longitudinaux d'un outillage d'emboutissage.

Pièces à obtenir en plusieurs emboutis. Rayon de raccordement du poinçon pour passes intermédiaires (aux première et dernière) ≃ 10*e* : éviter l'amincissement de métal à la jonction des emboutis.
Rayon du poinçon de dernière passe : correspond à celui de la pièce à obtenir.
Rayon d'entrée R_e : à déterminer par la formule de KACZEMAREK, soit :

$r_e = i \cdot \sqrt{(D-d_1) \cdot e}$, avec i = 0,8 pour les aciers, 0,9 pour les alliages d'aluminium et de cuivre.
Rappel : D = diamètre du flan ; d_1 = diamètre de l'embouti dans la passe ; e = épaisseur du flan.

Trous d'air

Ils peuvent être nécessaires sur les gros outillages (fig. 8.29).
Poinçon : favoriser son dévêtissage.
Matrice : assurer un mouvement d'air entre matrice et serre-flan (fig. 8.29), évitant une déformation éventuelle d'emboutis en s'opposant à une compression-aspiration d'air dans le cycle.

Jeu fonctionnel

Affecté aux poinçons : pièce de dimension extérieure précise.
Affecté à la matrice : pièce de dimension intérieure précise (fig. 8.32).
Jeu j admis entre poinçon et matrice : il se situe entre un minimum et un maximum, qui correspond à : 1,2 *e* > j > e + IT, avec IT : intervalle de tolérance en fabrication.

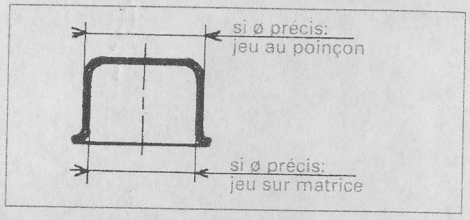


FIGURE 8.32 Jeux axiaux poinçon et matrice.

Serre-flan

S'oppose au glissement du flan sous l'effet d'emboutissage pour éviter la formation de plis dans l'embouti.
Trop de pression d'un serre-flan déchire l'embouti ; une pression insuffisante génère des plis.
La pression du serre-flan doit être répartie pour emboutir des pièces dissymétriques (un ou plusieurs joncs augmentent la pression).

Décolleur

Il peut être nécessaire, dans l'éjecteur, pour dégager la pièce qui adhérerait avec le

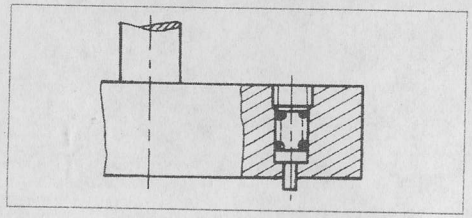


FIGURE 8.33
Décolleur sur éjecteur.

poinçonnage du flan (fig. 8.33).

Effort d'emboutissage F_e

Pour emboutir un flan, on considère : F_e(daN) = $\pi \cdot d \cdot e \cdot R_m \cdot k$, pour outillages : sans serre-flan ; avec serre-flan, en utilisant une presse à double effet (la force nécessaire au serre-flan étant inférieure à celle du poinçon).
Avec : d = diamètre du poinçon (mm) ; e = épaisseur du flan (mm) ; R_m = résistance à la traction (daN/mm²) ; k = rapport du poinçon / diamètre D du flan (mm).

Outillage avec serre-flan utilisé sur presse à simple effet

L'effort à produire correspond à la somme des efforts d'emboutissage et du serre-flan F_s.

On considère $F_s = \pi / 4 \, (D^2 - d^2) \cdot p$,
avec p = pression spécifique du serre-flan (daN/cm²) (fig. 8.34).

FIGURE 8.34
Pressions spécifiques du serre-flan.

Matériaux	P (daN/cm²)
Acier d'emboutissage	24
Acier inoxydable	20
Aluminium (recuit)	12
Duralumin (recuit)	15
Laiton - Cuivre	20

Cornes d'emboutissage

Une variation de résistance du matériau due au sens de laminage de la tôle, en particulier, provoque une irrégularité de forme au sommet de l'embouti. Nécessite le détourage de la pièce (fig. 8.35).

Nota : L'augmentation du rayon de matrice diminue l'effort d'emboutissage.

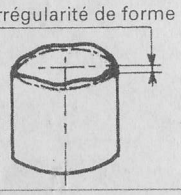


FIGURE 8.35 Profil du sommet d'embouti.

2.15 Outillages combinés

Ils permettent de réaliser plusieurs opérations différentes dans une seule passe (un aller-retour du coulisseau de presse).
Très utilisés pour la production en grande série de petites pièces emboutes.

Outillage combiné d'emboutissage-découpe

Effectue l'emboutissage dans la bande de tôle et la découpe de la pièce dans le même cycle (boîtes métalliques...) (fig. 8.36).

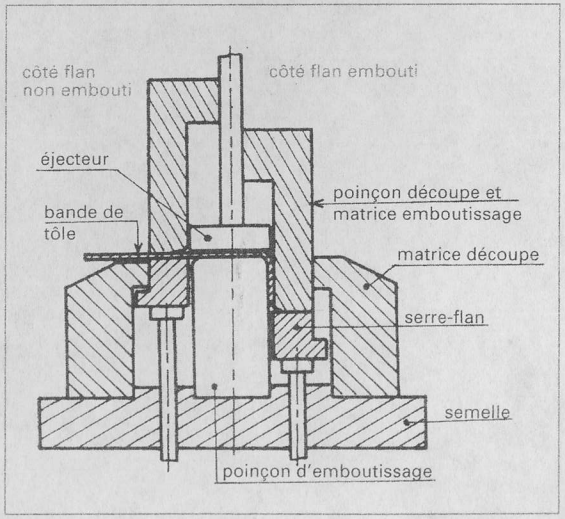


FIGURE 8.36
Schéma d'outillage combiné emboutissage-découpe.

Outillage combiné d'emboutissage - poinçonnage - découpe

Production d'une pièce avec contre-embouti ou ajourage dans la bande de tôle en une passe (fig. 8.37).

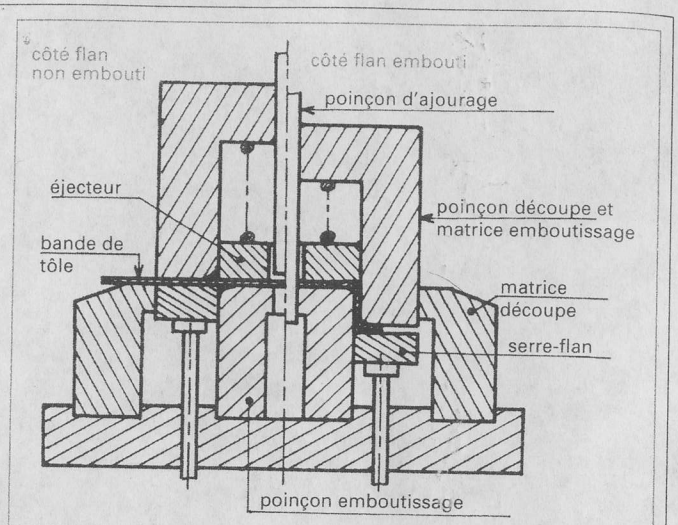


FIGURE 8.37
Schéma d'outillage combiné emboutissage-poinçonnage-découpe.

Outillage combiné ou à suivre

Production, dans la bande de métal qui avance d'un pas après chaque passe, d'une pièce finie. (fig. 8.38).

L'avancement est assuré (comme en découpe) par enlèvement latéral d'une portion de tôle, sur un côté de la bande, à l'aide du couteau (fig. 8.39).

Les diverses opérations d'emboutissage et poinçonnage sont effectuées avant découpe.

On utilise ce procédé en production de grande série en particulier, dans diverses industries (ménagère, automobile, motocycle, etc.).

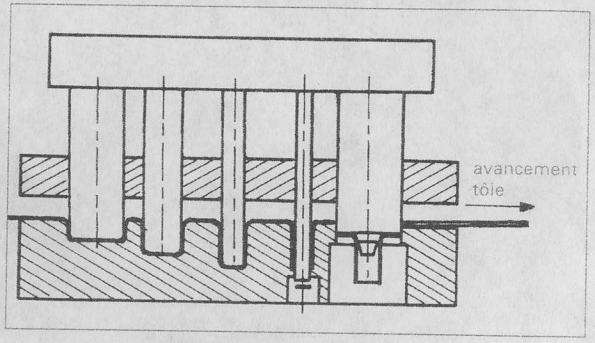


FIGURE 8.38 Schéma d'outillage à suivre.

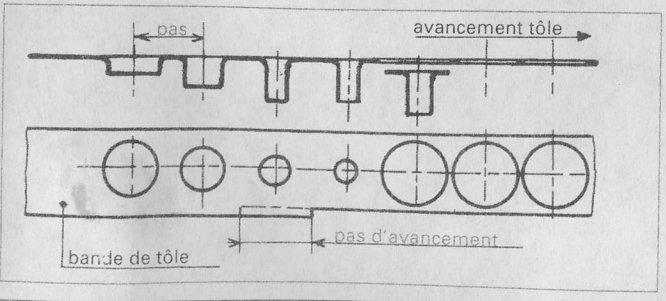


FIGURE 8.39
Avancement de la bande de tôle de l'outillage à suivre (fig. 8.38).

3. Formage par pliage

3.1 Généralités

Production, par déformation, de pièces de forme développable et à plis rectilignes, sous l'action d'une force – appliquée avec le poinçon – agissant suivant le pli à obtenir. Le flan (ou la pièce semi-finie) est maintenu d'un côté ou en appui sur deux côtés opposés, parallèlement au sens du pli, dans la matrice (fig. 8.40).

Angle de pliage

À la cessation de l'effort, l'angle de la forme pliée α_1 diffère légèrement de l'angle de pliage α_0 causé par l'élasticité du matériau. Ce retour élastique, le ressaut, varie en fonction : du matériau ; de la mise en œuvre du procédé (en l'air ou en fond de matrice) (fig. 8.40).

Zone pliée

L'épaisseur du flan est sensiblement réduite avec : un léger élargissement à l'intérieur du pli, le foisonnement $f \simeq 0{,}4\ e/R$, avec e épaisseur du flan, R rayon de pliage-intérieur ; un léger rétrécissement de l'extérieur du pli (fig. 8.41).

Le pliage s'effectue : avec un outillage poinçon-matrice (petites pièces en série) ; en l'air avec un outillage « flexible » (pièces de grandes à petites dimensions).

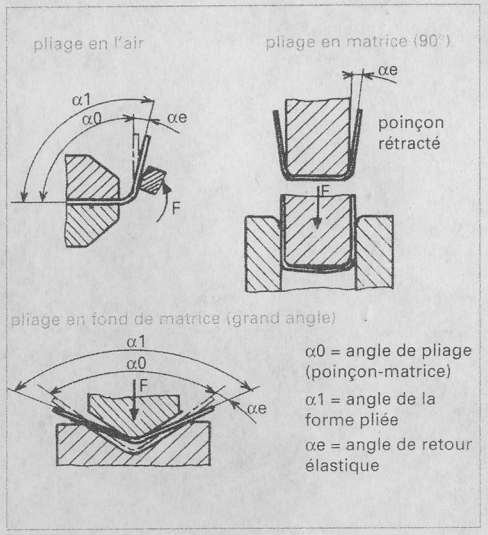


FIGURE 8.40 Schémas des pliages.

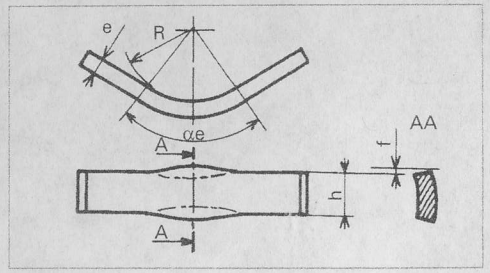


FIGURE 8.41
Déformations de la zone pliée.

3.2 Détermination du flan

Sous l'effet du poinçon, les fibres du matériau sont soumises :
– à la traction à l'extérieur du pli, provoquant un rétrécissement ;
– à la compression à l'intérieur du pli, provoquant un élargissement.
Il y a équilibre des déformations sur la fibre neutre.

Longueur du flan fibre neutre

elon l'angle et le rayon R de pliage, la fibre eutre se situe du milieu de l'épaisseur e du an vers l'intérieur du pli.
a position définit la longueur du flan (son éveloppement théorique) (fig. 8.42).
ratiquement, on admet que la fibre neutre st située à :
/2 avec $R/e \geq 3$;
/2,5 avec $R/e \simeq 2$; $e/3$ avec $R/e \simeq 1$.

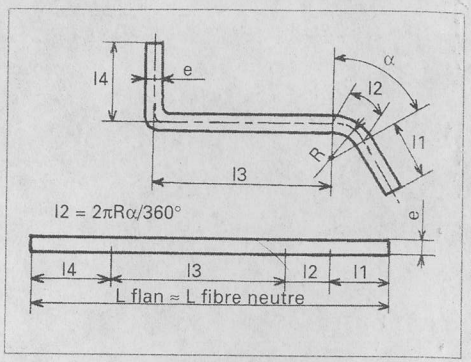


FIGURE 8.42
Définition longueur d'un flan.

ens de pliage

erpendiculaire au sens de laminage, ou ans une direction intermédiaire (fig. 8.43), particulier pour matériaux écrouis ou durs ciers, laitons...).
précision de positionnement du pliage est quelques dixièmes de mm.
angle de pliage s'obtient avec précision rès annulation du ressaut (0,5 à 2°).

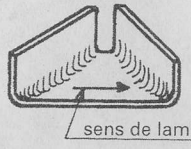


FIGURE 8.43 Sens du laminage pour pliages concourants.

ayon de pliage minimum

considérer, pour éviter des criques, en fonction de l'épaisseur du flan et du matériau (limite astique).
us le rayon de pliage est faible et plus la déformation est grande.
yon limite de pliage $R \geq e$, avec $e \leq 4$ mm ; $R \simeq 2\,e$, avec $e > 4$ mm.
iter la naissance de criques causée par le dépassement de la limite d'allongement des fibres térieures (les plus tendues).

3 Effort de pliage

st plus important en pliage en matrice qu'en pliage en l'air (2 à 3 fois supérieur).

Effort de pliage en l'air

n sur deux appuis (fig. 8.44), à déterminer approximativement par la formule :

$= \frac{1{,}3.\ l.\ e^2.\ R_m}{d}$ avec

longueur du pli (à la fibre neutre) en mm,
épaisseur du flan en mm,
distance des appuis du flan en mm,
= résistance à la rupture daN/mm².

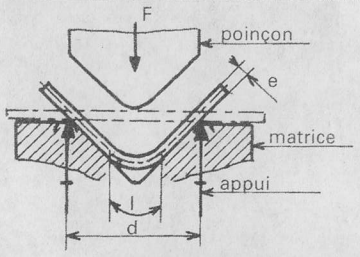


FIGURE 8.44
Pliage en l'air sur 2 appuis (à fond de forme en vé).

Effort de pliage en matrice

À déterminer approximativement, par la forme : $F \simeq 0{,}7 \cdot l \cdot R_m \cdot e\,(1+e/d)$ (fig. 8.45).

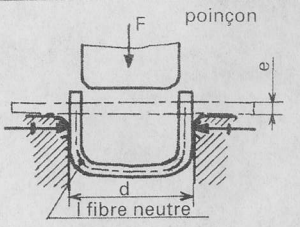


FIGURE 8.45
Pliage en matrice.

3.4 Matériaux utilisés

Tôles laminées à froid (pliables généralement avec $R = e$) ; tôles laminées à chaud (qualités E).

3.5 Pliage en l'air

À effectuer à la machine à plier ou à la presse-plieuse, en production unitaire ou de série, sur flans de toutes épaisseurs.
Un volet-presseur maintient le flan d'un côté, le pliage étant obtenu par basculement d'un volet-plieur, réglé au rayon de giration (fig. 8. 46).

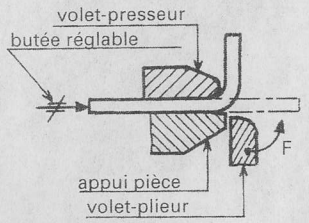


FIGURE 8.46
Schéma du pliage en l'air.

Pliages successifs sur un flan

À l'aide d'un appui spécifique adapté au volet-presseur (fig. 8.47).

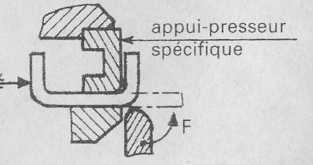


FIGURE 8.47
Schéma de pliages successifs sur une pièce.

Extrémités des poinçons

Pour ne pas marquer la pièce dans le pli intérieur, prévoir sur le poinçon : un méplat de 0,5 à 1 mm pour $e \leq 4$ mm ; un rayon de 4 à 6 mm pour $e > 4$ mm (fig. 8.48).

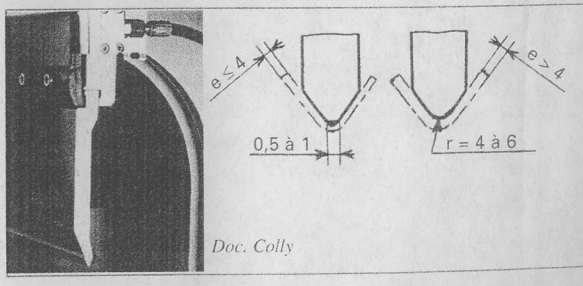


FIGURE 8.48
Extrémités des poinçons en pliage à fond de forme en vé.
Doc. Colly

Matrice en élastomère

Pour flans plastifiés, préoxydés, en acier inoxydable, cuivre, laiton, aluminium poli : évite de marquer la pièce dans le pli extérieur (fig. 8.49).

Utilisation

Production de pièces de grande et de petite longueur, selon la capacité-machine avec un outillage standard, pour divers angles et plusieurs plis.

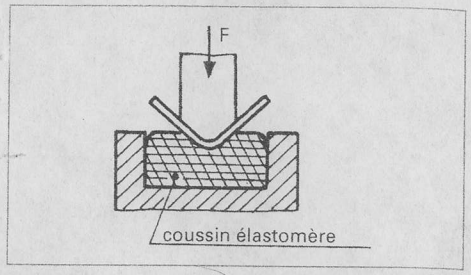


FIGURE 8.49 Pliage d'une pièce sans la marquer.

3.6 Pliage en matrice

À effectuer avec un outillage poinçon-matrice spécifique au produit à obtenir, en production de série pour petites à moyennes pièces de faible épaisseur ($e = \leq 4$ mm).
L'outillage est conçu pour effectuer différents pliages (en vé, en équerre, en Z, en U, un bordage).

Effort de pliage

Il peut être continu, par fléchissement ou avec frappe, à fond de matrice (fig. 8.50).
Le pliage avec frappe annule le ressaut et l'effet est double du pliage.

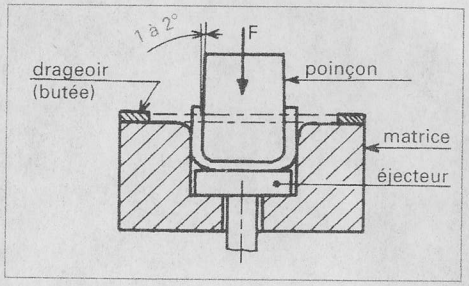


FIGURE 8.50
Schéma d'outillage de pliage en matrice par frappe.

Angles de pliage relativement précis

Écraser par fléchissement le galbe du fond de pièces en U, avec le fond de matrice bombé et le poinçon ajusté en creux) (fig. 8.51).

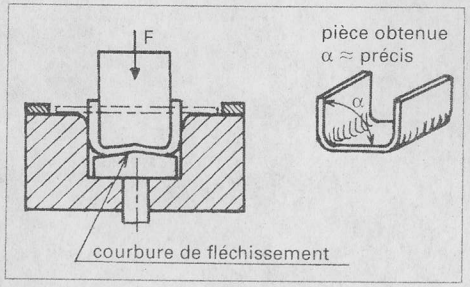


FIGURE 8.51
Schéma d'outillage de pliage à angle précis en matrice.

Éjecteur

Le fond de matrice, pour les différents types d'outillages, est conçu en éjecteur : assure le maintien du flan contre le poinçon, en début d'opération ; dégage la pièce formée en fin d'opération (fig. 8.50 à 8.57).

Rayons sur arêtes du poinçon et de la matrice

Ils sont admis à deux épaisseurs du flan.

Pliage en vé

Formage à un angle donné, d'un flan en position par les drageoirs (deux butées en opposition) (fig. 8.52).
La matrice doit être plus haute que le poinçon pour résister à l'effet de coin du poinçon.
L'angle de pliage du vé doit être inférieur à celui de la pièce (2 à 3°) pour compenser le ressaut.
Les ailes du flan plié n'ont pas à être engagées totalement dans la matrice.

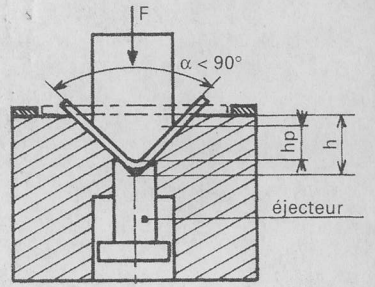


FIGURE 8.52 Schéma d'outillage de pliage en vé dans matrice.

Pliage en équerre

Formage à un angle de 90°, avec de préférence un outillage où le flan est situé horizontalement sur la matrice (fig. 8.53).
L'aile la plus grande est située sur l'éjecteur.
L'aile la plus courte pénétrera totalement dans la matrice, après son relevage.
L'effet de chasse du poinçon est compensé par l'éjecteur et le drageoir, ou par l'éjecteur avec des pilotes de centrage du flan.
L'éjecteur agit avec une forte pression pour s'opposer au glissement du flan, durant le pliage (frottement sur rayon de matrice).

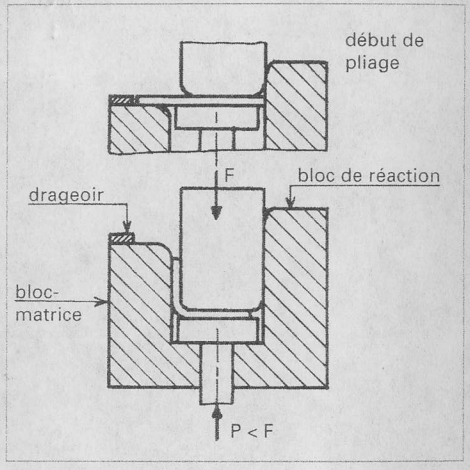


FIGURE 8.53
Schéma d'outillage de pliage en équerre.

Pliage en Z

Formage, en une opération de deux plis en équerre, par un outillage avec serre-flan (fig. 8.54).
Le serre-flan doit agir avec une pression s'opposant au glissement latéral du flan.

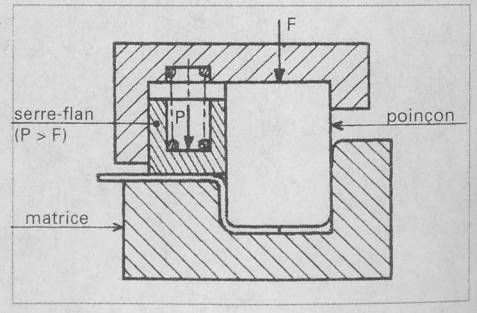


FIGURE 8.54
Schéma d'outillage de pliage en Z.

Pliage en U

Formage simultanément de deux ailes opposées sur un flan, sans effet de chasse (fig. 8.55).
Le poinçon dépincé (1 à 2°) permet d'obtenir l'angle désiré, le ressaut assurant la non-adhérence pièce/poinçon.

8

Une bague d'éjection, située au-dessus de la matrice, éjectera si nécessaire les pièces adhérentes à la remontée du poinçon.

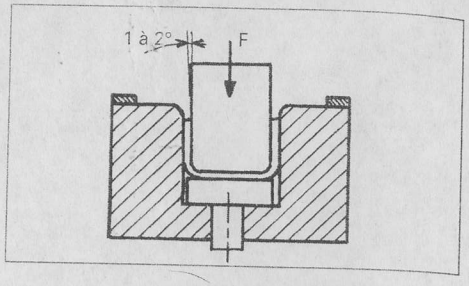


FIGURE 8.55
Schéma d'outillage de pliage en U.

Pliage en double U (à ailes extérieures)

Formage, en une opération, de pièces à bord court (double pli) (fig. 8.56).

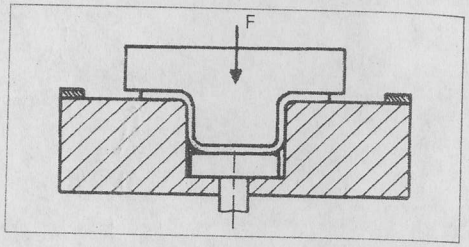


FIGURE 8.56
Schéma d'outillage de pliage en double U.

Bordage

Roulage du bord d'un flan (de faible épaisseur) à l'aide d'un outillage spécifique, après pliage en U (fig. 8.57).

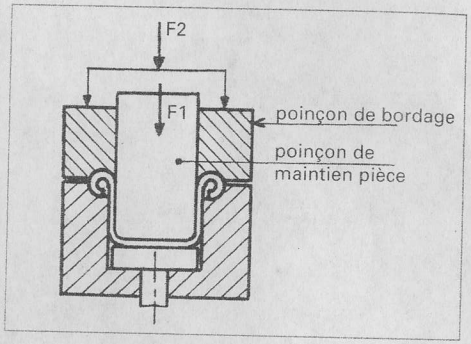


FIGURE 8.57
Schéma d'outillage de bordage après pliage.

3.7 Outillages de pliage

Pour production en petites séries de petites pièces, peu précises angulairement, sur presses d'emboutissage.
Les efforts mis en jeu doivent être parfaitement équilibrés entre le poinçon et la matrice (guidages par colonnes ou talon).
Éléments constitutifs du poinçon et de la matrice, de conception modulaire : à situer en position rigoureuse (centreurs).

Raccordements

Le glissement de la tôle est favorisé par un rayon r ≃ 2e sur poinçon et matrice (fig. 8.58).
Gros outillages. Chanfrein de 2 à 5 mm à 45°, raccordé par rayons.

Jeu fonctionnel poinçon/matrice

Jeu j = 1/10e, à affecter au poinçon ou à la matrice, selon la position de précision à obtenir (fig. 8.58).
Dimension extérieure précise : jeu au poinçon ; dimension intérieure précise : jeu à la matrice.

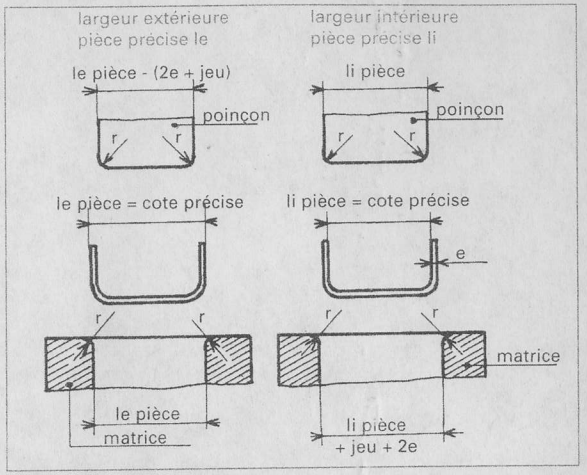


FIGURE 8.58
Jeu fonctionnel poinçon-matrice et rayons de raccordement.

Course de l'éjecteur

À limiter éventuellement pour éviter son adhérence à la pièce (cas des petits outillages).

Outillages de grande série ou de grandes dimensions

Les pièces d'usure seront interchangeables.
Ces outillages devraient réaliser la totalité des diverses opérations de pliage nécessaires à l'obtention du type de pièces à produire.

Outillages combinés

Ils effectuent les diverses opérations de découpe, emboutissage, pliage (voir « Procédé d'emboutissage »).
Les matrices multiformes à positionnement rapide assurent la flexibilité de production.

3.8 Presses-plieuses

Machines de type mécanique ou à programmation numérique avec mouvements hydrauliques : pour pliage longs (1 à 6 m selon capacité des machines, de puissance jusqu'à 5 000 KN).

4. Formage par extrusion

4.1 Généralités

Déformation à froid d'une ébauche, par compression entre un poinçon et une matrice.
La plasticité du métal provoque son écoulement qui génère une pièce en fonction de l'outillage poinçon-matrice mis en œuvre (fig. 8.59).
Selon l'outillage de mise en œuvre, le procédé est appelé : filage direct ou avant-filage inverse ou arrière, filage latéral, refoulage, écrasage, étirage.
Les lopins (les bruts) sont calibrés en forme et en poids. En filage inverse, ils peuvent être calibrés par une opération d'écrasage en matrice.

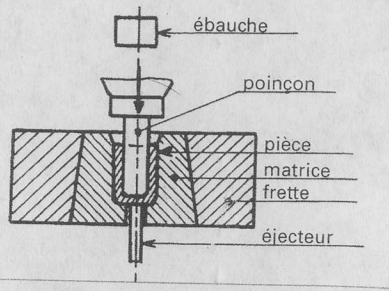


FIGURE 8.59 Schéma d'outillage de formage par extrusion (filage inverse).

4.2 Filage direct ou avant

Le matériau s'écoule au travers de la filière – la matrice – suivant le sens du déplacement du poinçon (fig. 8.60).
Selon l'outillage, les pièces obtenues sont pleines, tubulaires, avec collerette, d'épaisseur décroissante...

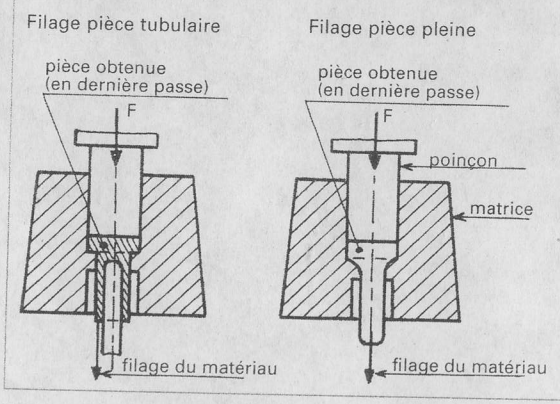


FIGURE 8.60
Schémas du filage direct.

4.3 Filage inverse ou arrière

Le matériau s'écoule le long du poinçon (dans le sens inverse de son déplacement) (fig. 8.61).
Selon l'outillage, les pièces obtenues sont pleines ou tubulaires.

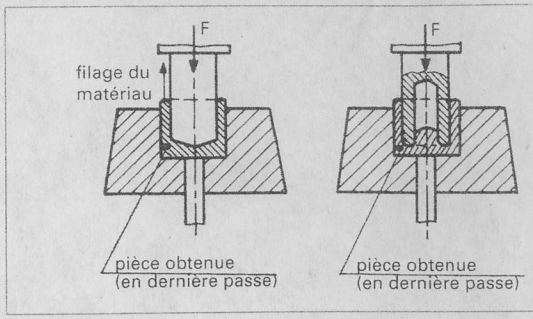


FIGURE 8.61
Schémas du filage inverse (pièces tubulaires).

4.4 Filage latéral

La matériau s'écoule dans un orifice situé perpendiculairement au sens de déplacement du poinçon (fig. 8.62).
Les pièces obtenues comportent une saillie de forme.

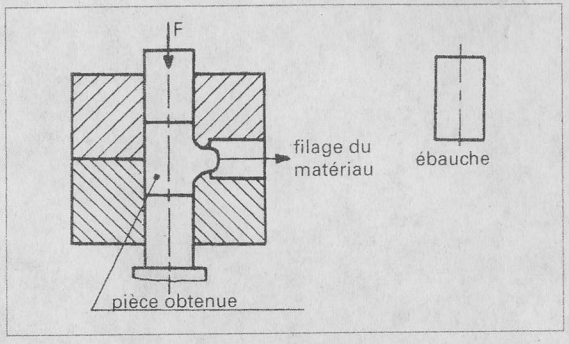


FIGURE 8.62
Schéma du filage latéral.

4.5 Refoulage

Sur une extrémité du lopin, le matériau s'écoule dans un orifice de forme (fig. 8.63).
Les pièces obtenues comportent une tête ou une collerette.

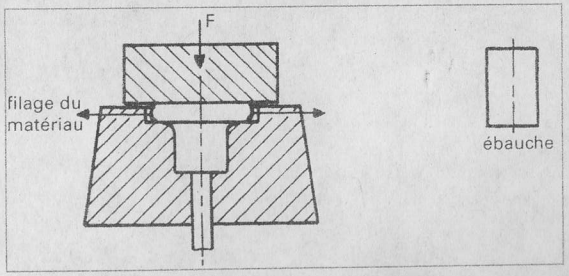


FIGURE 8.63
Schémasd'opération de refoulage

4.6 Écrasage

Le lopin s'écoule librement sous le tas ou dans une matrice de forme, poinçon et matrice étant à fond plat (fig. 8.64).

Les pièces obtenues sont des bruts modifiés à une forme donnée (préparation de lopins de filage inverse).

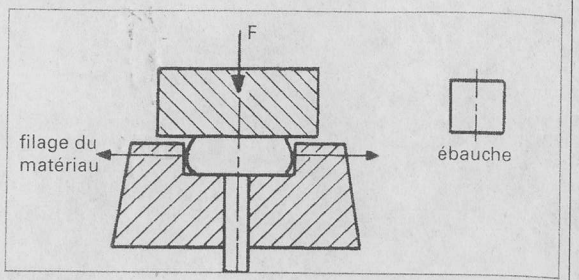


FIGURE 8.64
Schéma d'opération de refoulage.

4.7 Étirage

Le lopin plein, ou creux avec un fond, s'écoule au travers d'une filière sous l'action du poinçon agissant sur le fond de la pièce (fig. 8.65).
Les pièces obtenues sont à section pleine ou tubulaire avec un fond.

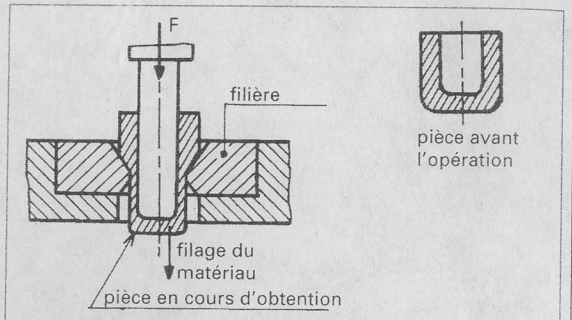


FIGURE 8.65
Schéma d'opération d'étirage.

4.8 Caractéristiques des pièces

Généralement les pièces obtenues sont de type symétrique (fig. 8.66).
Elles conservent le poids du lopin à 1 % près (économie de matière).
Leurs formes sont sans dépouille ; l'état de surface obtenu est 1,6 Ra.
Les caractéristiques mécaniques sont améliorées par le fibrage du matériau.
L'écrouissage de la pièce peut succéder à un traitement thermique.

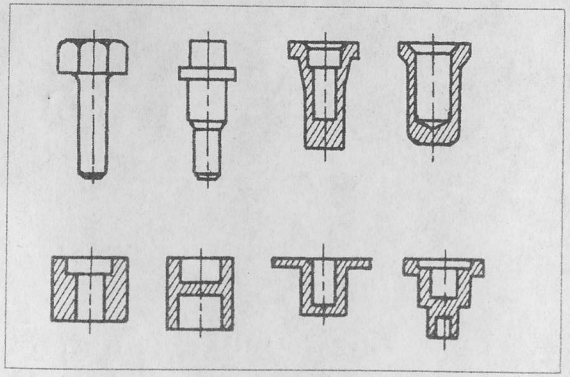


FIGURE 8.66 Différentes pièces produites par extrusion (en filage).

4.9 Réduction de diamètre des lopins au filage

Pour une opération, elle est fonction de la structure du matériau.
Filages direct et inverse, réductions maximales : 60 % pour les aciers alliés ; 70 % pour les aciers doux ; 95 % pour les alliages d'aluminium et de cuivre.

Taux de réduction R

Écrouissage maxi avant rupture en fonction des sections de la matrice S_m et de la forme filée S_f, soit $R = (S_m - S_f/S_f)$. $100 \leq 70$ %.

Opérations successives de filage

Leur nombre varie en fonction du taux de réduction (fig. 8.67 et fig. 8.68).
Un recuit de régénération peut être pratiqué entre deux opérations.

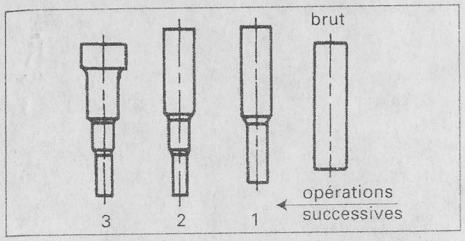


FIGURE 8.67 Cycle de production d'une pièce en filage direct.

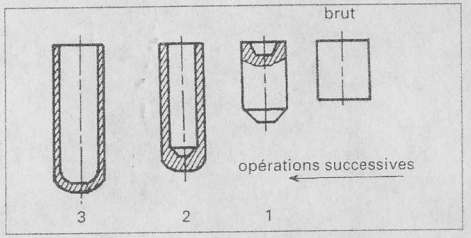


FIGURE 8.68 Cycle de production d'une pièce en filage inverse.

4.10 Longueur filée par opération

Selon les matériaux, longueur admise à : 4 diamètres en filage inverse et 6 diamètres en filage direct des aciers ; 6 diamètres en filage des alliages d'aluminium et de cuivre.

4.11 Matériaux filés

Aciers à structure globulaire (XC10 à XC45, 16 MC5, Z6C13...) ; aluminium et ses alliages (ASG, AU2G, AU4SG...) ; cuivre et ses alliages (UZ10 à UZ36), UE5 à UE9, UN10 à UN45, UZ28N9...).

4.12 Mise en œuvre

Une lubrification adhérente est indispensable : opposition au grippage matériau/filière ; accroissement possible du nombre d'opérations ; protection de l'outillage.
Un film gras adhérent s'obtient par immersions successives dans un bain de phosphatation et un bain de savon alcalin.
Les matériaux utilisés pour poinçons et matrices sont en acier rapide (avec traitement thermique) ou en carbures métalliques.

4.13 Outillage de filage direct

La matrice est frettée : résistance aux efforts de compression agissant latéralement (fig. 8.69).
Alésage de filage par opération. Son diamètre est : fonction du taux de réduction ; de longueur limitée (≃ 5 mm) pour ne pas freiner l'écoulement ; raccordé par des rayons à l'alésage arrière et à l'angle de filage.
Pièces relativement longues : à maintenir à la sortie de filière par un guide : assure la rectitude de la pièce.
Jeu fonctionnel matrice-lopin : qualité H7 h 6, généralement.
Le poinçon est au diamètre correspondant à celui de la forme à filer (opération précédente).

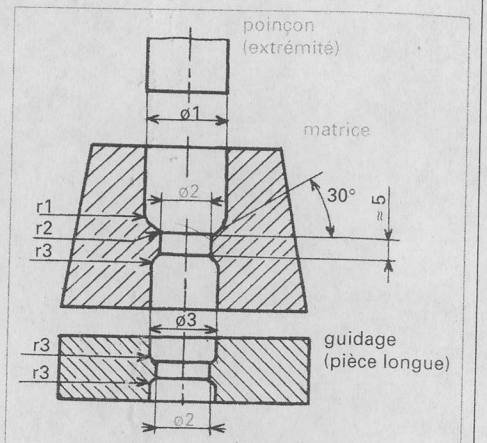


FIGURE 8.69
Poinçon et matrice pour filage direct.

4.14 Outillage de filage inverse

Schéma d'un outillage (fig. 8.70).

Poinçon

Son extrémité est conique (≃ 170°) : permet l'écoulement du matériau.
Son diamètre effectif est à la cote nominale sur ≃ 5 mm, prolongé par un cône (détalonnage à 10 %) de ≃ 10 mm.
Sa longueur maxi ≃ 4 diamètres du poinçon, évite le flambage.

Matrice

Sa longueur doit assurer le guidage de la pièce.

Nota : Épaisseur du fond de pièce : limiter à 0,7 épaisseur des côtés de la pièce.

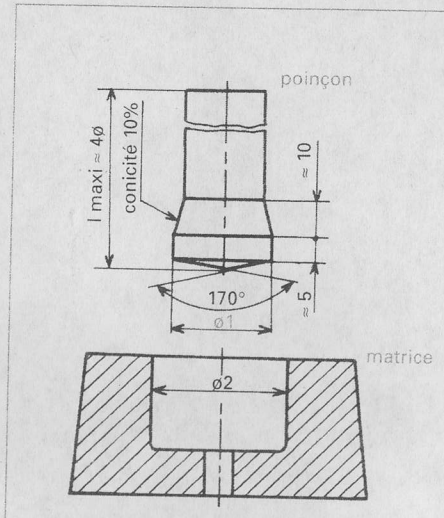


FIGURE 8.70
Poinçon et matrice pour filage inverse.

4.15 Effort d'extrusion

Appliqué au poinçon, F(daN) = $Sl \cdot p$, avec Sl = Section du lopin ; p, effort spécifique > $0.054 \cdot R_m \cdot (r - 10)$, d'après Pessl et Hauttmann.

4.16 Outillage hydrostatique d'étirage

Le poinçon est remplacé par un piston, le fouloir, avec joint d'étanchéité qui comprime un fluide (huile) dans un conteneur (fig. 8.71).
Le fluide agit de toute part sur le lopin : le lopin ou billette, ne flambant pas, peut être long.
La pression nécessairement élevée (3.10^9 Pa) nécessite une excellente étanchéité fouloir/conteneur.

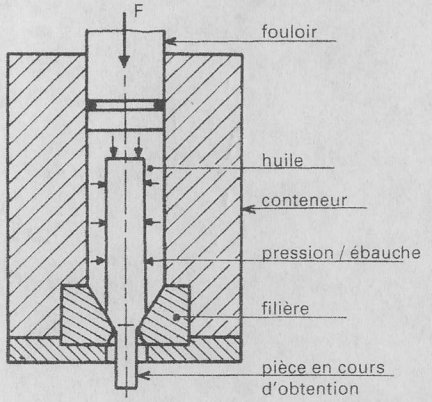


FIGURE 8.71
Schéma d'étirage hydrostatique.

4.17 Tréfilage

Procédé dérivé de l'étirage, à la différence que la pièce est filée (au travers d'une filière) par traction et non compression.
Les pièces produites sont calibrées en section.

4.18 Utilisation de l'extrusion

Généralement pour la grande série (petites pièces de type cylindrique).
L'étirage hydrostatique et le tréfilage sont utilisés en production de pièces longues.

5. Formage par fluotournage

5.1 Généralités

Déformation, à froid ou à chaud, d'une ébauche (flan de tôle, embouti...) par compression du métal sur une forme de référence, le mandrin.
L'ébauche est entraînée en rotation et une ou plusieurs molettes (les outils) provoquent le fluage du matériau suivant la trajectoire des molettes (fig. 8.72).
L'ébauche est maintenue sur le mandrin par un poussoir.
Selon les ébauches et les formes de référence, le fluotournage permet de produire des pièces cylindriques, coniques ou curvilignes.

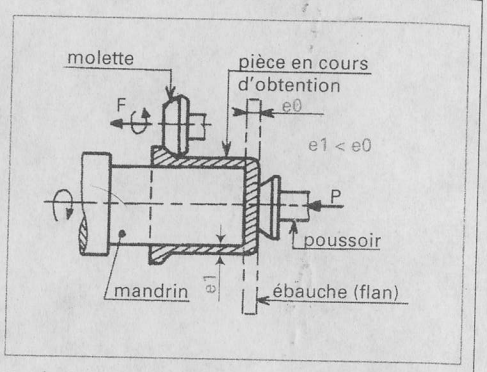


FIGURE 8.72 Schéma de fluotournage (cylindrique).

Écoulement du matériau

S'effectue dans de bonnes conditions avec une réduction d'épaisseur du flan : 30 % maxi pour les formes cylindriques ; 50 % maxi pour les formes coniques et curvilignes.

Réduction de l'épaisseur fluée

Plusieurs passes peuvent être effectuées pour réduire l'épaisseur fluée, si le taux d'écrouissage du matériau le permet, en fonction de la striction Σ %, avec une réduction maximale égale à $\Sigma . 1 / 0{,}17 + 0{,}01\ \Sigma$.

Taux d'écrouissage. Donné par la relation de réduction d'épaisseur des parois :

$$R\ \% = \frac{e_0 - e_1}{e_0} \cdot 100.$$

5.2 Formes cylindriques

Elles sont obtenues à une épaisseur donnée sur un mandrin cylindrique, à partir d'un flan et d'un embouti (fig. 8.73).
Un calibrage est nécessaire pour obtenir un diamètre précis.

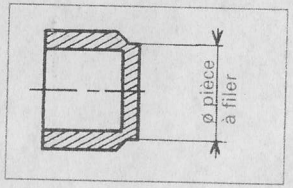


FIGURE 8.73
Ébauche préformée de pièce à filer cylindrique.

5.3 Formes coniques et curvilignes

Elles sont obtenues sur mandrins de la forme intérieure désirée (fig. 8.74 et fig. 8.75).
L'épaisseur des formes obtenues est réduite en fonction de la pente à obtenir, soit épaisseur fluée $e1 = e_0 \cdot \sin \alpha$, avec e_0 = épaisseur du flan ; α = pente du mandrin.

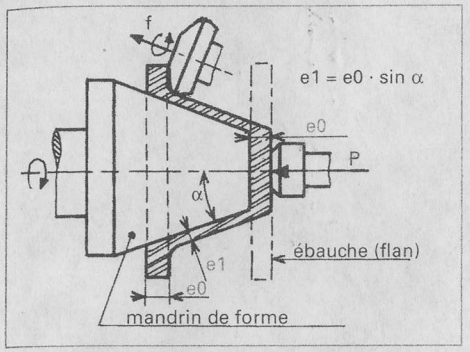


FIGURE 8.74 Schéma de fluotournage conique.

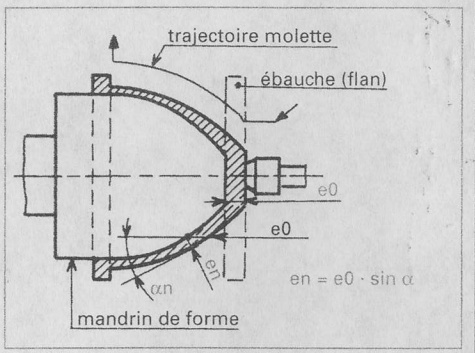


FIGURE 8.75 Schéma de fluotournage curviligne.

Formes curvilignes

L'angle de pente α variant, l'épaisseur de paroi n'est pas constante.
Les flans peuvent être préparés pour produire une paroi à épaisseur constante (ébauche obtenue par un autre procédé de fabrication) (fig. 8.76).

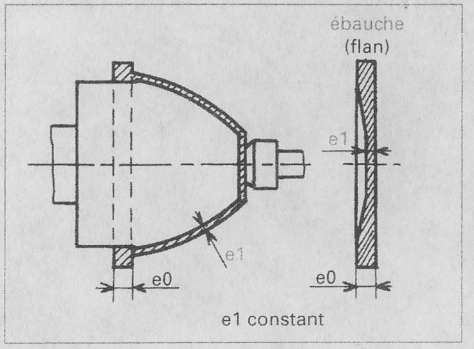


FIGURE 8.76
Forme d'ébauche pour pièce curviligne à épaisseur de paroi constante.

5.4 Outils-molettes

Le rayon des outils-molettes r_m correspond à :
Fluotournage cylindrique, r_m = 2 épaisseurs du flan e_0 ; fluotournage conique et curviligne, $r_m = e_0$.
Profil des molettes : angle d'attaque k (kappa) 50 à 70° ; angle de dégagement Ψ (psi) 20° ;
Diamètre généralement petit ; état de surface excellent (qualité poli) (fig. 8.77).

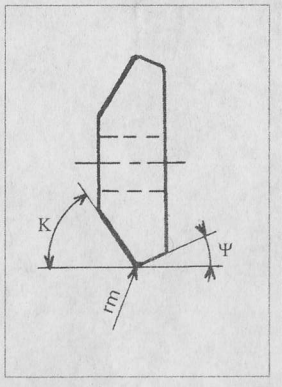


FIGURE 8.77
Profil des outils-molettes.

5.5 Matériaux utilisés

Avec coefficient d'allongement à froid A % ≥ 10 et une structure globulaire à grains fins.
Les matériaux durs et fragiles peuvent être fluotournés à chaud (tungstène à 1 200 °C, aluminium non allié à 200 °C...)
Les caractéristiques mécaniques sont modifiées et améliorées de 20 à 80 % maxi.

5.6 Précisions obtenues

Précision dimensionnelle. Sur épaisseur ≃ 0,04 à 0,10 mm maxi.
État de surface. Intérieur de la pièce, Ra ≥ 0,3 µm ; extérieur de la pièce Ra = 0,8 µm.

5.7 Utilisation

Obtention de pièces devant avoir d'excellentes caractéristiques mécaniques, en production unitaire et de série.

6. Formage sous haute énergie

6.1 Généralités

Une force développée sur un flan ou une préforme produit le plaquage dans la matrice, éliminant pratiquement toute élasticité résiduelle du matériau.
Le procédé est excessivement rapide dans sa réalisation (quelques micro-secondes).
Trois méthodes sont mises en œuvre : par explosion, par électromagnétisme, par électro-hydraulisme.
La matrice est le seul outillage à concevoir (coût réduit).
Les pièces obtenues sont d'excellente qualité (dimensionnelle et géométrique).
Sécurité de mise en œuvre impérative (grandes précautions d'utilisation).

6.2 Formage électro-hydraulique

La décharge en quelques micro-secondes de l'énergie électrique d'une batterie de condensateurs, entre deux électrodes, génère un plasma dans l'eau qui provoque une onde de chocs provoquant le plaquage du flan dans la matrice (fig. 8.78).
Le flan, ou la pièce tubulaire, est maintenu dans un conteneur métallique (rigide) associé à la matrice.
Les électrodes sont situées au voisinage de la forme à obtenir, dans la matrice, favorisant le formage.

Utilisation. Très peu employé (sécurité)

Le cas échéant, production de pièces de moyennes dimensions et relativement épaisses (quelques mm).

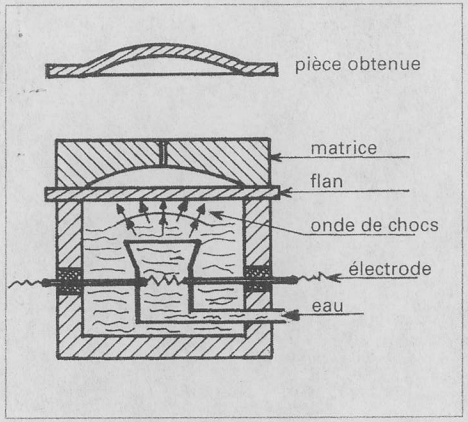


FIGURE 8.78 Schéma de formage électro-hydraulique.

6.3 Formage par électromagnétisme

Une batterie de condensateurs est déchargée de son énergie électrique dans une bobine en quelques micro-secondes, créant un intense flux magnétique dans l'enroulement de la bobine.
Le flan métallique étant situé dans le champ électromagnétique, les courants (de Foucault) induits créent un effet de répulsion, (forces de Laplace), issu de la bobine, qui plaque le flan dans la matrice (fig. 8.79).

Matériaux utilisés

Métalliques, bon conducteur électrique.
Un matériau à forte résistivité (inoxydable) est formable avec interposition d'une feuille de cuivre ou d'aluminium entre pièce et bobine.

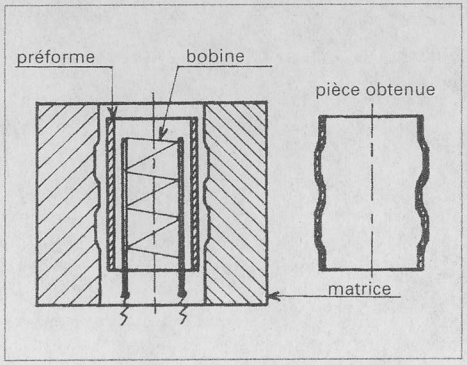


FIGURE 8.79 Schéma de formage électromagnétique (forme expansée).

Dimensions des pièces

Épaisseur maximale déformable. Aciers et laitons, ≃ 3 mm ; cuivre, alliages d'aluminium ≃ 6 mm.
Diamètre minimum des pièces tubulaires (préformes). Il est fonction de la section de la bobine par rapport à l'épaisseur de la pièce.
On considère : aciers, ø mini ≃ 30 épaisseurs pièce ; cuivre et alliages d'aluminium ≃ 10 épaisseurs pièce.

Outillage

Constitué par la matrice ou uniquement une pièce complémentaire à assembler avec la pièce déformée (sertissage) (fig. 8.80).

Utilisation

Formage par expansion et par rétreinte, principalement de pièces tubulaires (les bobines sont généralement de section circulaire) en production de série (petites et moyennes pièces).

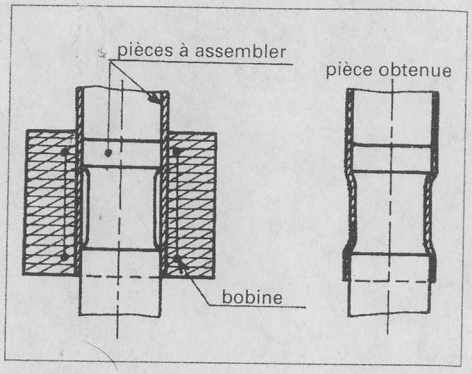
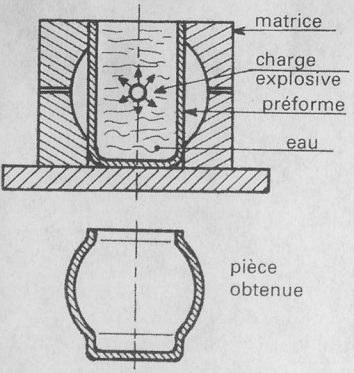


FIGURE 8.80 Sertissage de pièces par formage magnétique (forme rétreinte).

.4 Formage par explosion

ne onde de choc, provoquée par la mise à u d'une charge explosive située dans un nteneur d'eau incompressible (remplaçant poinçon) se propage dans l'eau qui plaque flan ou la préforme dans la matrice g. 8.81).

pièce est produite, à froid, dans un seul tir. nde de choc, qui se déplace à la vitesse personique (≃ 2 000 m/sec), est obtenue r l'onde de détonation du gaz créant l'exsion de la charge.



RE 8.82 Schéma de formage d'une préforme par sion.

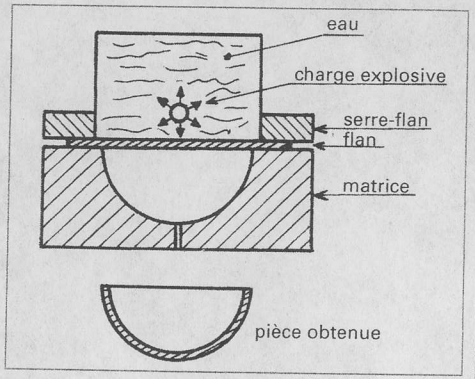


FIGURE 8.81 Schéma de formage d'un flan par explosion.

La précision de forme est assurée par la réalisation préalable d'un vide entre le flan ou la préforme et la matrice.
Le conteneur, renouvelable pour chaque pièce, est en un matériau facilement destructible (carton, plastique...).
La matrice peut être également immergée en piscine, à la place du conteneur.
En formage par expansion d'une forme préformée (cylindrique, conique...) c'est la forme qui est conteneur (fig. 8.82).

Matériaux utilisés

Tous les matériaux emboutissables sont formables par ce procédé.

Précisions obtenues

Dimensionnelle. Quelques dixièmes de mm à quelques mm, selon les matériaux et les dimensions des pièces (plusieurs mètres), en raison d'un faible retour élastique de la forme.
État de surface. Celui du flan ou de la préforme n'est pas altéré.
Caractéristiques mécaniques. Résistance à la rupture améliorée ≃ 10 %.
Épaisseur des pièces. Très épaisses (flans jusqu'à 100 mm). Avec une importante déformation, réduction d'épaisseur jusqu'à 15 mm dans la zone la plus proche de la charge.
Un préformage est nécessaire si diamètre du flan/épaisseur > 350.

Outillage

Constitué par la matrice : en matériau métallique (fonte, acier) pour la production de série de pièces sans grandes dimensions.
En travaux unitaires et de petites séries (pièces volumineuses) : matrice en mécano-soudure, ciment armé, résines renforcées.

Nota : un kilogramme de l'explosif utilisé (dit lent) a une force comparable à une presse de 5 000 KN.

Utilisation

Essentiellement pour l'obtention de formes hémisphériques, en expansion (en creux) d'un flan ou d'une préforme.
Production unitaire et de petites séries de pièces de grandes dimensions et très épaisses en aéronautique, transport, astronautique, chauffage... (réservoirs et citernes, en particulier).

8

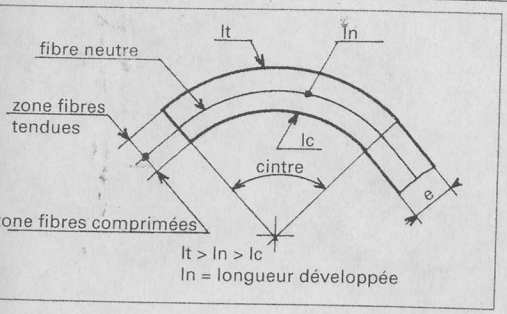
7. Cintrage

7.1 Généralités

Formage à froid de formes courbes sur des profilés, des tubes et des tôles.

7.2 Cintrages des tôles

Réalisation d'une surface courbe réglée à partir d'une surface également réglée, par allongement des fibres extérieures (tendues) et refoulement des fibres intérieures (comprimées), la fibre centrale ou fibre neutre étant de longueur invariable (fig. 8.83).
Le cintrage des tôles s'effectue sous l'action de trois rouleaux presseurs parallèles, disposés triangulairement et réglables en position relative, sur une rouleuse (fig. 8.84).



URE 8.83 Schéma de déformation des fibres d'une tôle cintrée.

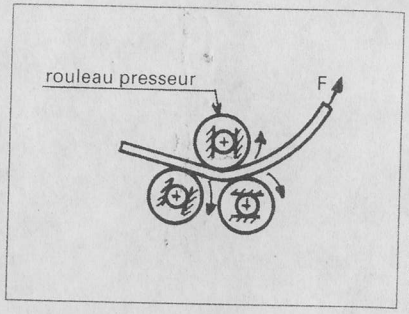


FIGURE 8.84 Schéma de cintrage à trois rouleaux.

Extrémités de la forme cintrée

le cintrage est effectué sur la totalité la tôle, les extrémités de la forme trée sont obliques et déformées sous sollicitations (tension et compres- n) (fig. 8.85).
s déformations aux extrémités sont gligeables pour les tôles minces.

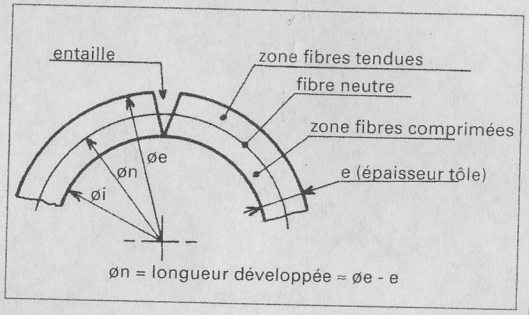


FIGURE 8.85 Déformation des extrémités de tôle épaisse cintrée en forme circulaire.

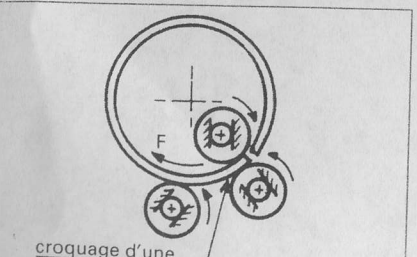
Longueur développée

st la longueur de la fibre neutre, sidérée à la fibre centrale.

Mise en œuvre

oles

ès roulage au cintre désiré d'une forme cylindrique, la virole, les extrémités peuvent subir croquage » : cintrage de ces extrémités libres, par actions opposées de deux des trois rou- x (fig. 8.86).
les de petit diamètre. Formage avec un mandrin, quatrième rouleau central au diamètre a pièce tubulaire à obtenir (fig. 8.87).



E 8.86 Schéma de croquage (d'une extrémité de

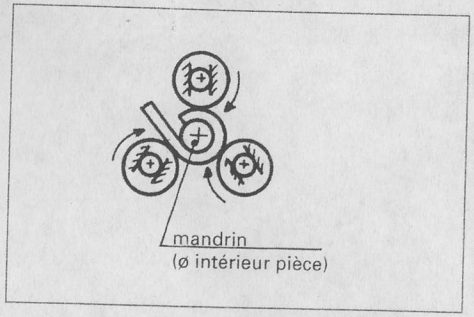


FIGURE 8.87 Schéma de cintrage d'une virole de petit diamètre.

Tôles minces

Leur cintrage peut nécessiter au préalable un écrouissage superficiel brisant les fibres de la tôle (cas où les génératrices de la forme cintrée sont parallèles au sens du laminage).

Tôles épaisses

Chanfreiner les bords, pour éviter la naissance de criques au cintrage.

Machines

Elles sont du type à trois rouleaux réglables (en programmation numérique).
Elles peuvent être à quatre rouleaux, le quatrième, étant situé en opposition au rouleau supérieur, permet le croquage des extrémités de la pièce (début et fin d'opération) (fig. 8.88).

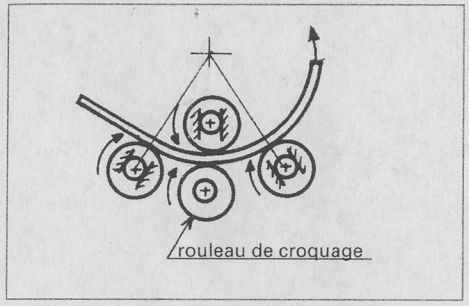


FIGURE 8.88 Schéma de cintrage à quatre rouleaux.

Cintrage de tôles longues (à grand rayon de courbure)

Utiliser des rouleuses verticales, pour éviter la déformation des tôles sous leur poids.

Cintrage de tôles épaisses (jusqu'à ≃ 250 mm)

Formage à froid ou à chaud avec des presses à cintrer (fig. 8.89).

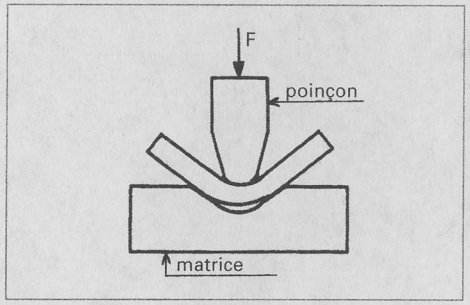


FIGURE 8.89 Schéma de cintrage des tôles très épaisses.

8

7.3 Cintrage des tubes et des profilés

Cintrage par flexion de la pièce. Les fibres de la forme cintrée subissent les mêmes contraintes qu'en cintrage des tôles.
La pièce est cintrée sur une forme, une extrémité étant fixe et l'autre étant tirée sur la forme (fig. 8.90).
Les fibres de la pièce tendent à se rapprocher du cylindre moyen, provoquant une modification de l'épaisseur et de la section de la pièce (tube ou profilé).
La compression des fibres intérieures au cylindre moyen fait plisser le métal.

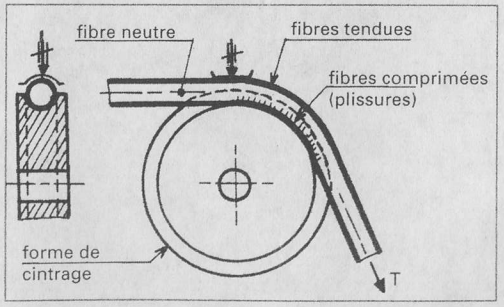


FIGURE 8.90 Schéma de cintrage d'un tube (cintreuse à CN).

Effort de traction

Inférieur à la limite élastique du matériau pour s'opposer : aux déformations de section de la pièce (tube en particulier) ; à la modification de son épaisseur (diminution à l'extérieur et augmentation à l'intérieur du cylindre moyen).

Mise en œuvre

Cintrage de tubes et de profilés de faible épaisseur : pour éviter une déformation de section, on applique un effort de traction.
Utiliser un mandrin, l'olive, dans les tubes : évite une déformation de section (fig. 8.91).

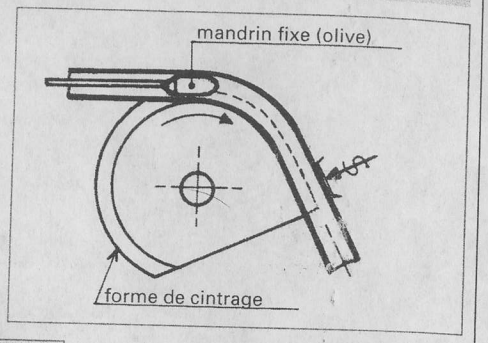


FIGURE 8.91
Schéma de cintrage avec guide intérieur (olive).

Utiliser un galet de forme pour les profilés : évite le plissement du métal à l'intérieur du cintre (fig. 8.92).

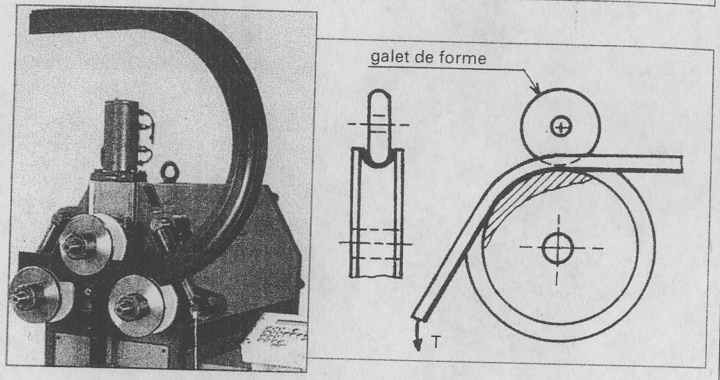


FIGURE 8.92
Schéma de cintrage d'un profilé.
Doc. SDP

Pièces de forte section. Ne se déforment pas, les fibres réagissent comme dans les tôles (les fibres intérieures se refoulent sans trop de risque de plissures).
Profilés à ailes (U, T, N).
Cintrage de grand rayon, par allongement d'une aile ou allongement et compression simultanés de deux ailes (fig. 8.93).

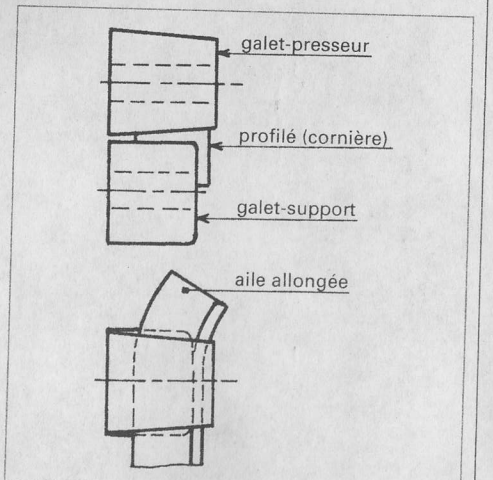
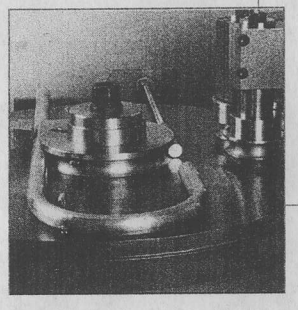


FIGURE 8.93
Schéma de cintrage d'un profilé à ailes.

Machines

Formage de pièces comportant plusieurs cintres, de rayons et de positions angulaires et dimensionnelles différentes ou non : avec cintreuse à CN qui réalise toutes les opérations successives programmées, en travail par traction.
Travaux non sériels. Utilisation de cintreuses travaillant par flexion sous la pression d'un galet-cintreur ; provoque un équilibre des contraintes ; annule les plissures internes (fig. 8.94).



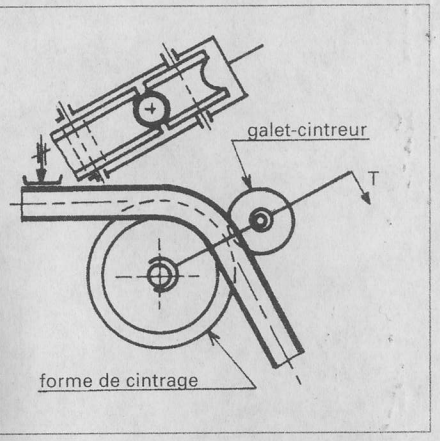


FIGURE 8.94
Schéma de cintrage d'un tube avec galet-cintreur.
Doc. IRLE

7.4 Pliages des profilés

Il peut être considéré comme un cintrage de petit rayon (≃ 1,5 maximum de l'épaisseur de l'aile pliée).
Une préparation préalable est nécessaire, le grugeage pour les profilés à deux ailes (cornières, tés).

Grugeage

Découpe d'un évidement sur l'aile intérieure au pli à obtenir de valeur α = 180° – angle à former (fig. 8.95).

Profilés cornières

Pliage de l'aile extérieure (fig. 8.95).
Rayon de cintrage ≥ 1,5 épaisseur de l'aile. Le sommet de l'angle grugé sera formé d'un plat égal à l'épaisseur de l'aile à plier.

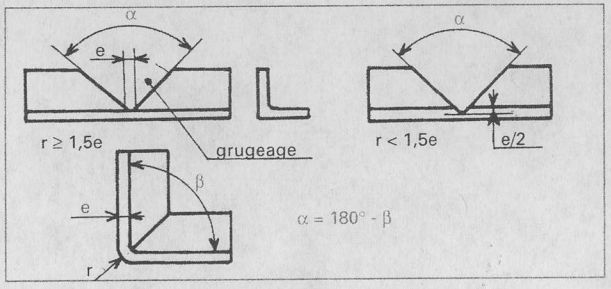


FIGURE 8.95 Pliage de profilé à ailes.

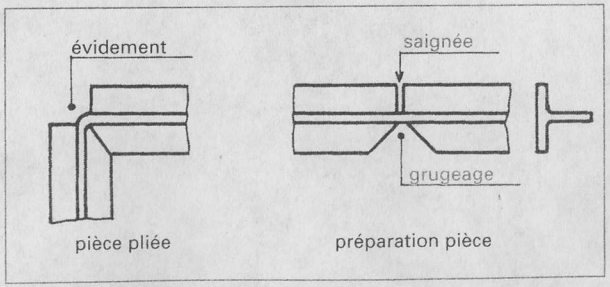


FIGURE 8.96 Préparation des profilés en T et I avant pliage.

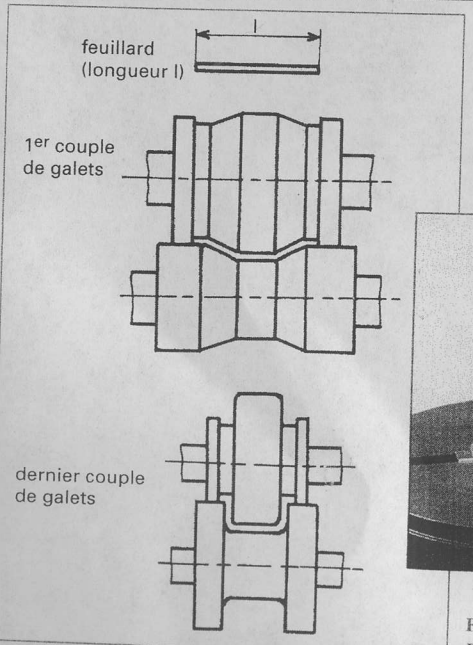
Rayon de cintrage < 1,5 épaisseur de l'aile. Le sommet de l'angle grugé sera situé à mi-épaisseur de l'aile à plier.

Profilé en T et I

Une saignée opposée au grugeage permettra le pliage avec l'obtention d'une entaille (à obturer pour rigidifier la zone pliée) (fig. 8.96).

8. Profilage à froid

8.1 Généralités



Déformation progressive, à froid, d'une bande métallique plane, sans réduction de son épaisseur, par son avancement entre une série de couples de galets aux formes complémentaires (fig. 8.97).

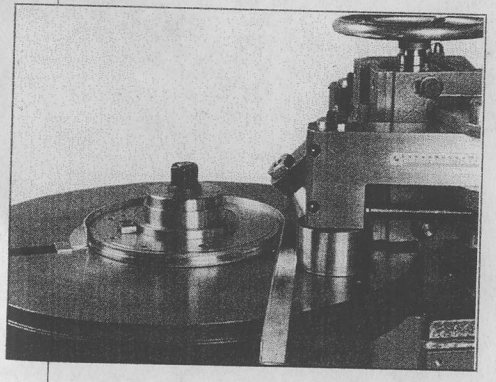


FIGURE 8.97 Couples de galets de profilage (profil ouvert). *Doc. IRLE*

8.2 Galets de profilage

Chaque couple de galets, monté dans une cage (réglage autonome) a un profil défini par sa position dans la série des couples nécessaires à l'obtention du profilé.

La simulation des profils successifs constitue une figure en étoile (fig. 8.98).

Vitesses de défilement

Le profilé défile dans les galets entre 40 à 150 m/min (forte productivité).

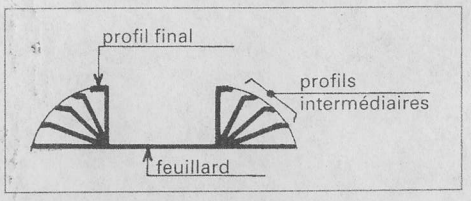


FIGURE 8.98 Étoile des profils de galet pour obtenir une forme.

8.3 Matériaux utilisés

Aciers laminés (à chaud et à froid) galvanisés, prélaqués, inoxydables ; aluminium et ses alliages ; cuivre et ses alliages.

Largeur du feuillard

C'est le développé de la fibre neutre du profil à obtenir.
Elle est de 10 à 600 mm, avec des épaisseurs de 0,5 à 8 mm.

8.4 Précisions obtenues

Rectitude et vrillage sont de bonne qualité pour ces produits semi-ouvrés.
La limite d'élasticité du matériau est modifiée aux pliures.

8.5 Machines

Elles comportent de 5 à 30 cages porte-galets, selon les profils à obtenir.
La production est continue : alimentation avec une bobine de la bande métallique, le feuillard.
Les profilés obtenus sont découpés en longueur commerciale de 6 mètres, automatiquement sur la machine de profilage.

8.6 Utilisation

Production en grande série de profilés très divers (métallerie, bâtiment, transport : bardages, armatures, huisseries, planches, profilés de structure légère...).

9 PROCÉDÉS DE FRAISAGE

1. Généralités 271
   1.1 Outils - fraises 274
   1.2 Vitesses d'avance 279
   1.3 Vitesses de coupe 281
   1.4 Choix des vitesses de coupe et d'avance 281
   1.5 État de surface 281
   1.6 Puissance nécessaire à la coupe Pw 282
2. Surfaçage - dressage 284
   2.1 Généralités 284
   2.2 Fraises à surfacer 284
   2.3 Fraise à surfacer-dresser 285
   2.4 Mise en œuvre du surfaçage-dressage 286
3. Rainurage 288
   3.1 Généralités 288
   3.2 Fraises à rainurer à queue 289
   3.3 Fraises à rainurer coupe centrale, à queue, ou à rainurer-plonger ou à dent perçante 289
   3.4 Fraises à rainurer en T 290
   3.5 Fraises à rainurer trois tailles, ou fraises-disques 290
   3.6 Fraises à rainurer pour clavettes disques (woodruff) 291
   3.7 Fraises-scies 291
   3.8 Mise en œuvre du rainurage 292
4 Fraisage de profils 293
   4.1 Généralités 293
   4.2 Fraises à copier ou hémisphériques 293
   4.3 Fraises à détourer, ou en bout à plaquettes rondes 294

5 Fraisage de forme 295
5.1 Généralités 295
5.2 Fraises concaves 295
5.3 Fraises convexes 296
5.4 Fraises coniques 296
5.5 Fraises à fileter 297
5.6 Fraises à chanfreiner 297
5.7 Fraises à gorge (de circlips...) 297
6. Mise en œuvre du fraisage 298
6.1 Trajectoires des fraises (mouvements d'avance) 298
6.2 Mise en position des pièces 298
6.3 Conception des outillages porte-pièces 301
6.4 Opérations d'usinage autres que fraisage (alésage, perçage, filetage) ... 302
6.5 Menus d'usinage 302
6.6 Machines 302
6.7 Fraiseuses à portique 304
6.8 Fraiseuses universelles avec règles de mesure des déplacements 304

1. Généralités

Production par outils de coupe de formes précises à directrices rectilignes, circulaires ou quelconques, sur des pièces de type généralement prismatique (plate ou cubique) à partir de bruts coulés, forgés, débités dans la masse.

Pièces produites

Elles peuvent être très petites (quelques mm^2) ou très volumineuses (plusieurs mètres de longueur et plusieurs tonnes) en fonction de la capacité des machines.
Elles sont fraisées dans l'ensemble des matériaux métalliques et non métalliques, avec des fraises (outils à arêtes de coupe généralement multiples) de formes adaptées aux profils à générer (fig. 9.1, 9.2, 9.3).

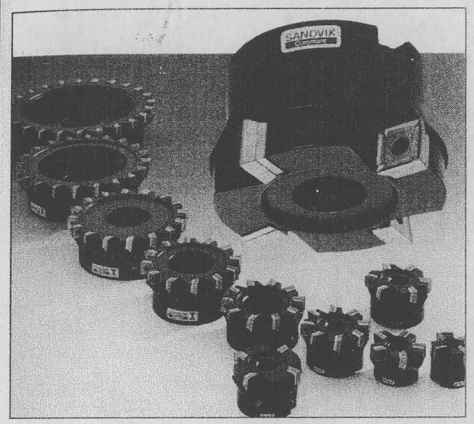


FIGURE 9.1 Fraises à surfacer-dresser.
Doc Sandvik-Coromant

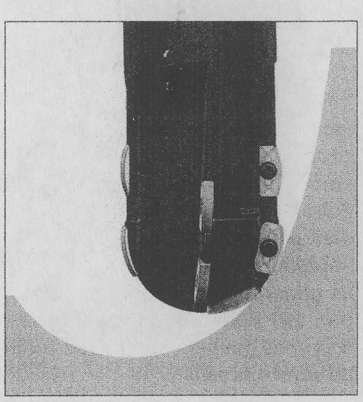


FIGURE 9.2 Opération de fraisage hémisphérique.
Doc Sandvik-Coromant

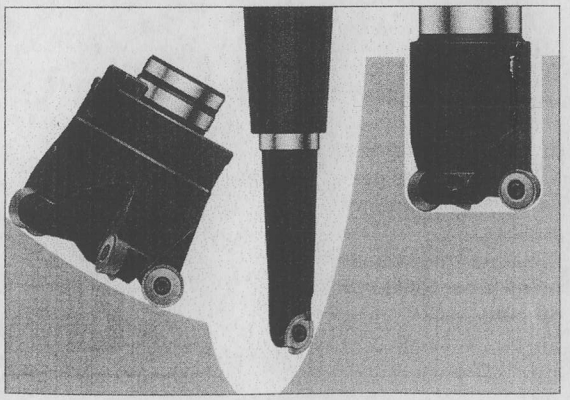


FIGURE 9.3 Opération de fraisage-détourage.
Doc Sandvik-Coromant

Précisions obtenues

Dimensionnelle. Qualité 7 ; 6 avec machines très précises (de petites dimensions).
État de surface. 1,6 à 0,8 Ra en surfaçage, rainurage, fraisage de profil et de forme ; 0,8 à 0,4 Ra en dressage.

Machines utilisées

En fonction des dimensions et des types de pièces (plates, cubiques...) de la productivité, on utilise : des fraiseuses, des centres d'usinage à broche verticale, horizontale ou orientable (dites universelle), des fraiseuses spécifiques (à portique...), aux capacités diverses (déplacement en X de 300 mm à plusieurs mètres).

Mouvements générateurs

Les arêtes principales de coupe étant situées en périphérie de l'outil, la fraise enlève la matière uniquement par son profil. Selon les types de fraises, la forme obtenue sera parallèle ou perpendiculaire à l'axe de l'outil, ou les deux à la fois (fig. 9.4)
La génération des formes fraisées s'obtient par les deux mouvements de coupe et d'avance qui peuvent être de même sens ou de sens opposés.

Mouvement de coupe

Mouvement circulaire donné aux fraises, outils rotatifs (généralement multi-arêtes) qui travaillent par enveloppe du profil à réaliser.

Mouvement d'avance

Rectiligne, circulaire, quelconque, est donné à la pièce ou à l'outil, selon la conception et le type des machines.
Fraiseuses. Les différents mouvements d'avance possibles (X, Y, Z) sont plus généralement attribués à la pièce par l'intermédiaire de la table porte-pièce.
Centres d'usinage. Chaque mouvement d'avance est attribué selon le concepteur, au porte-pièce ou au porte-outil.

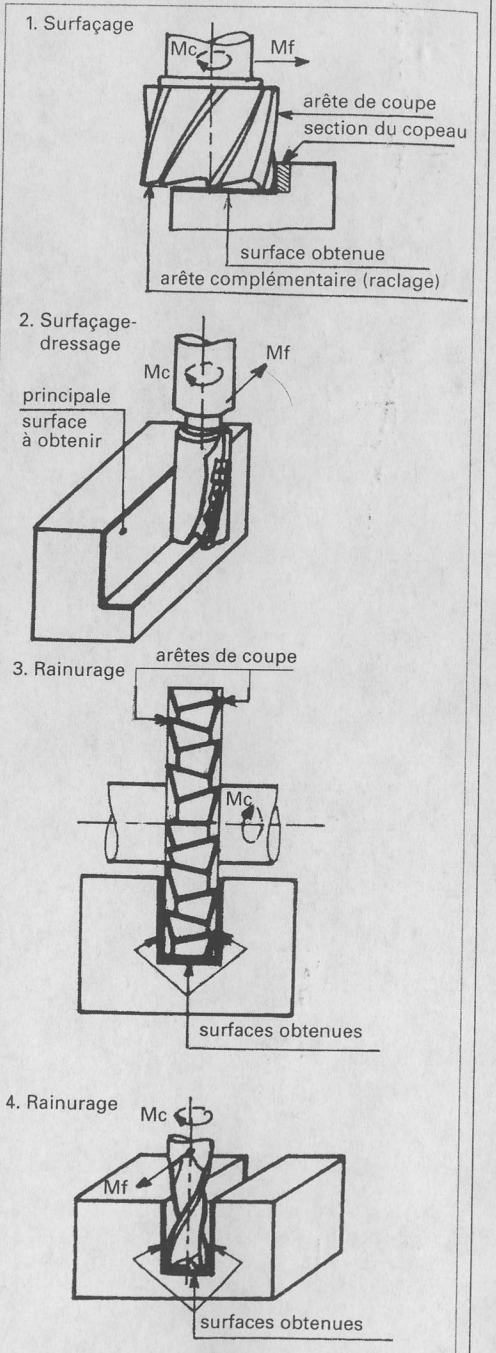


FIGURE 9.4
Schémas d'opérations de fraisage.

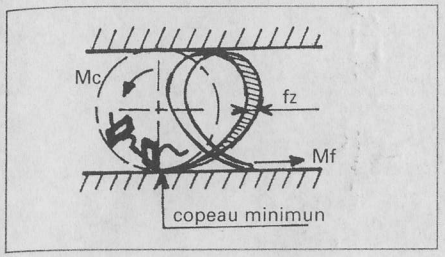


FIGURE 9.5 Mouvement cycloïdal des dents de fraise au travail.

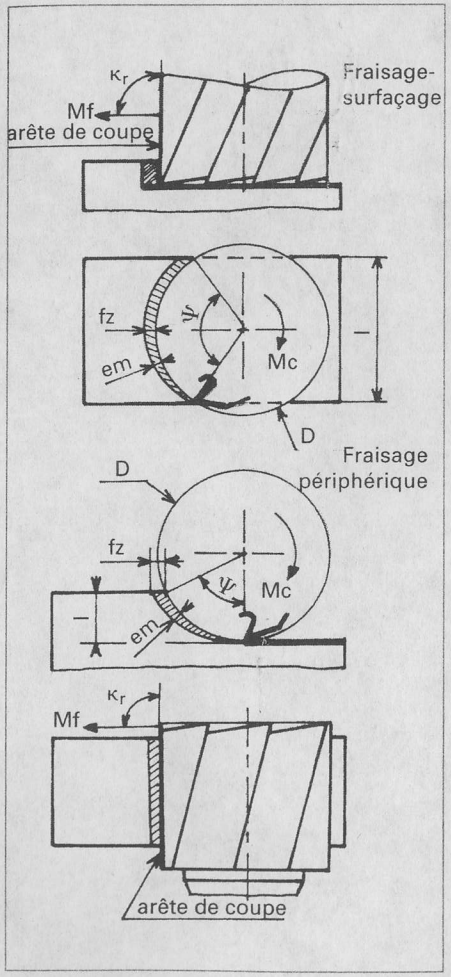


FIGURE 9.6 Épaisseur moyenne des copeaux de fraisage.

Copeau produit

La combinaison des deux mouvements (coupe et avance) provoque un mouvement cycloïdal à chaque arête de coupe.
Le copeau produit par chaque dent, entre deux courbes cycloïdales successives, varie d'un maximum à un minimum allant jusqu'au copeau minimum (fig. 9.5).

Épaisseur du copeau

Non uniforme, il est fonction du diamètre de la fraise D, de l'avance par dent fz et de la profondeur radiale l_r (fig. 9.6).
Pour les calculs de puissance nécessaire à la coupe, on détermine l'épaisseur moyenne du copeau em, soit :

$$em = \text{Sin } \chi_r . 360°/\pi . (f_z . l_r/\Psi . D),$$

avec χ_r = angle de direction d'arête
fz = avance par dent :
lr = profondeur de passe radiale ;
Ψ = angle de l'arc du copeau ;
D = diamètre de la fraise.
En pratique, on admet la formule approchée donnant une approximation très suffisante, soit : $em = f_z \sqrt{l_r/D}$.
L'épaisseur moyenne du copeau fournit une mesure univoque de la force moyenne de coupe, une relation existant entre la pression spécifique de coupe Ka et l'épaisseur moyenne du copeau em.

Fraisage en concordance ou en avalant

Les deux mouvements (coupe et avance) convergent dans la même direction (fig. 9.7)

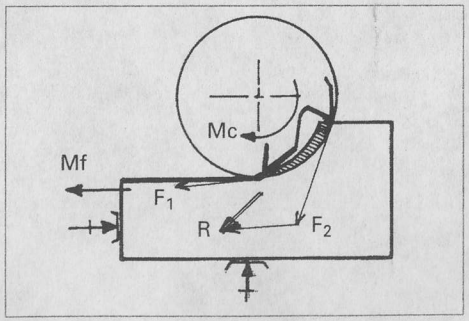


FIGURE 9.7 Fraisage en concordance ou en avalant.

Chaque dent attaque la matière par le copeau maximum : la pression spécifique de coupe est minimale, réduisant l'usure de l'arête de coupe, mais avec contrainte sur la dent.
Mode de fraisage nécessitant impérativement que le mouvement d'avance soit sans jeu fonctionnel : utilisation systématique sur fraiseuses CN et Centres d'Usinage (avec système vis-écrou à billes, sans jeu).
La composante principale de la résultante d'efforts de coupe des dents en prise simultanée dans la matière tend à plaquer la pièce sur son support.

Fraisage en opposition

Les deux mouvements, coupe et avance, s'opposent au point d'attaque de chaque dent dans la matière (fig.9.8).
Utilisation impérative sur fraiseuses ayant éventuellement le système d'avance vis-écrou sans rattrapage de jeu.
Mode de fraisage évitant la rupture des dents, causée par le jeu vis-écrou du mouvement d'avance.
Chaque dent attaque la matière par le copeau minimum. La pression spécifique de coupe est élevée, accentuant l'usure de l'arête et provoquant un état de surface macrogéométrique inférieur à l'autre mode (ondulations).

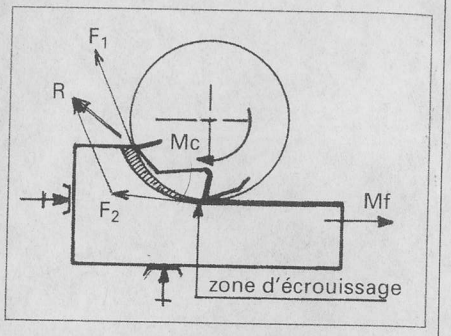


FIGURE 9.8 Fraisage en opposition.

La direction des efforts de coupe des dents en prise simultanée dans la matière tend à soulever la pièce : fixation judicieuse sous de gros efforts de coupe.

Fraisage de surfaçage

(Surface obtenue perpendiculairement à l'axe de la fraise.) Chaque dent travaille alternativement en avalant et en opposition (fig. 9.9).
Afin de faire travailler l'outil selon le mode désiré – en avalant ou en opposition – une fraise de diamètre supérieur à la largeur fraisée sera décalée dans le sens désiré, en assurant la condition de deux dents en prise simultanée dans la matière, au minimum.
Assurer la continuité des efforts de coupe appliqués à la pièce : faire travailler au moins deux dents en prise simultanée dans la matière.

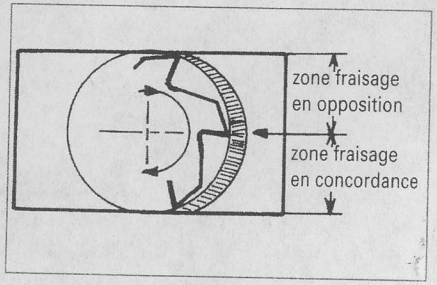


FIGURE 9.9 Fraisage de surfaçage.

1.1 Outils - fraises

Les différents types de fraises et leurs angles caractéristiques sont normalisés (NF E 66.200, etc.)
Les fraises, qui sont conçues pour réaliser des surfaces pouvant être parallèles et/ou perpendiculaires à l'axe de la fraise, correspondent à des familles d'outils (fig. 9.10), soit :
Fraises cylindriques : à surfacer, à surfacer-dresser, à rainurer.
Fraises de forme : à copier, à détourer, à profiler, à chanfreiner, à fileter...

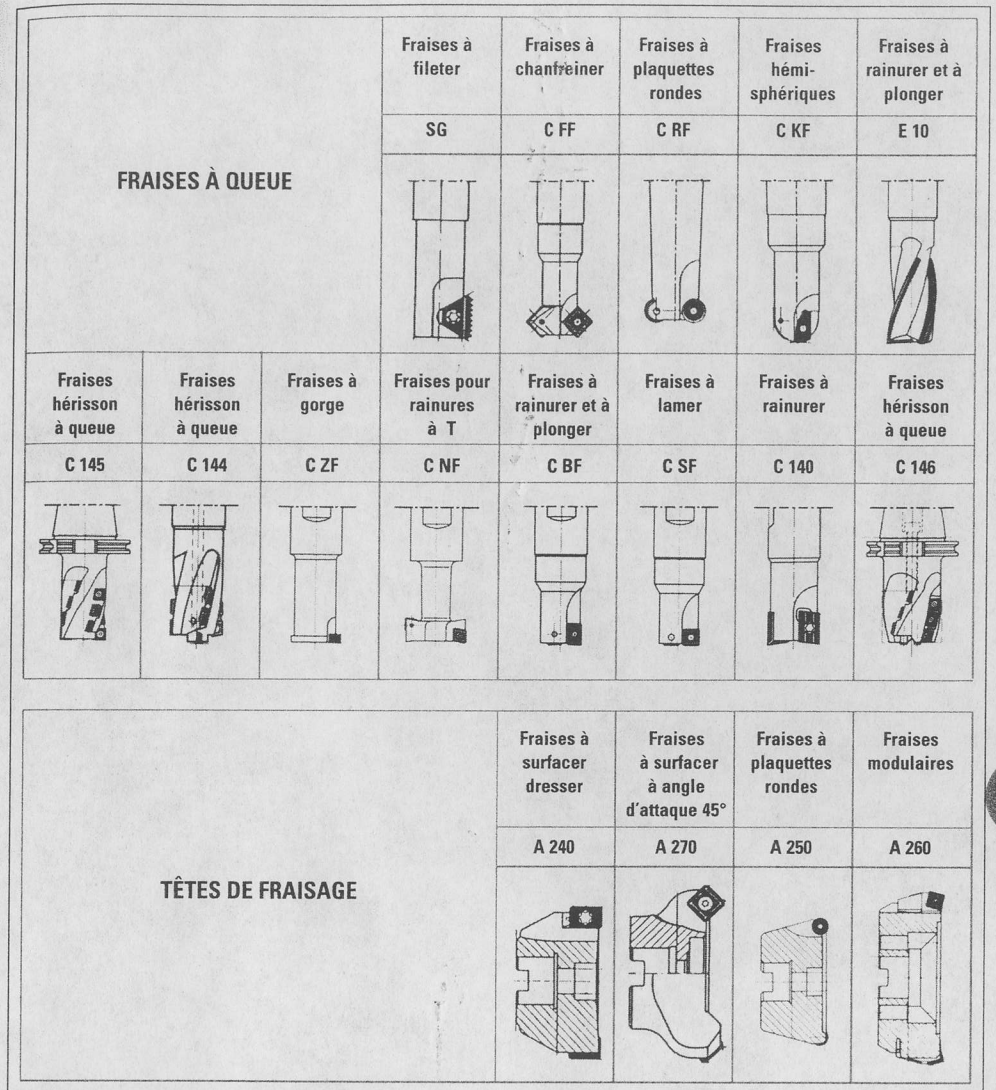


FIGURE 9.10 Différentes familles de fraises. *Doc. Plansee TIZIT*

Elles travaillent essentiellement de profil (et non en bout) sauf : les fraises à coupe centrale travaillant en plongée et en translation (de profil) ; les fraises à copier et à détourer qui peuvent plonger dans la matière (en prise de passe généralement).
Le diamètre nominal de chaque fraise est celui de travail (diamètre maximum de coupe) et sa valeur est prise dans la série des nombres Renard.

Définition géométrique

Les angles caractéristiques de la partie active de l'outil sont contenus dans des plans de référence.

Angles de l'utilisateur

Outil en main, avec les directions de coupe et d'avance supposées orthogonales (fig. 9.11).
On considère, pour chaque partie active de l'outil, qui comprend une arête de coupe principale :

- la face de coupe sur laquelle se déroule le copeau ;
- la face dépouille, au regard de la surface travaillée ;
- l'arête de coupe principale, intersection des faces de coupe et de dépouille ;
- l'arête de coupe secondaire, dont l'intersection avec l'arête de coupe principale forme le bec ou pointe d'outil ;
- le plan de référence P_r qui passe par l'axe du corps d'outil ;
- l'angle de direction d'arête κ_r (kappa r) formé par le plan d'arête P_s et le plan de travail P_f, dans le plan de référence P_r ;
- l'angle de coupe orthogonale γ_0 (gamma $_0$) formé par la face de coupe et le plan de référence P_r, dans le plan orthogonal P_0 ;
- l'angle de dépouille orthogonal α_0 (alpha $_0$) formé par la face de dépouille et le plan d'arête P_s, dans le Plan orthogonal P_0 ;

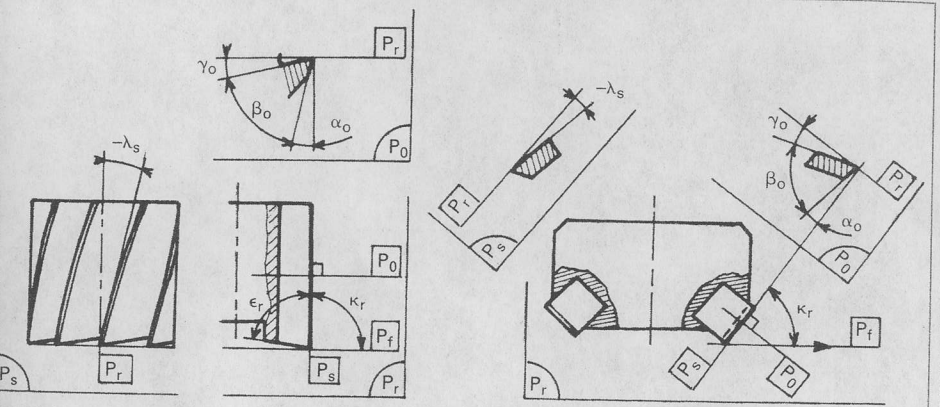


FIGURE 9.11 Plans de référence et angles caractéristiques des fraises.

- l'angle de taillant β_0 (bêta $_0$) dont la valeur est $90° - (\gamma_0 + \alpha_0)$;
- l'angle d'inclinaison d'arête λ_s (lambda $_s$) formé par l'arête de coupe principale et le plan de référence P_r, dans le plan d'arête P_s ;
- le bec, intersection des arêtes de coupe principale et secondaire, dans le plan de référence P_r, à angle vif ou biseau plan b_ϵ, ou rayon de bec r_ϵ (fig. 9.12).

La partie active des outils de fraisage est en carbures métalliques, en acier rapide généralement revêtu TIN, en coronite.

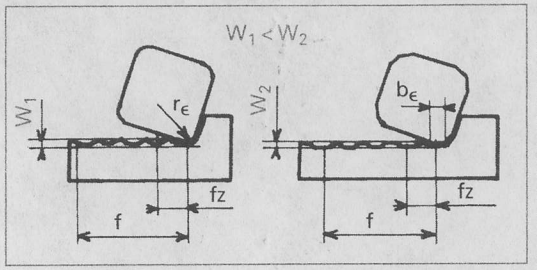


FIGURE 9.12
Becs d'outils fraise.

Plaquettes en carbure métallique

Elles sont généralement fixées mécaniquement sur le corps d'outil porte-plaquettes.
Pour obtenir une arête de coupe suffisamment longue, les plaquettes sont fixées en chapelet sur une directrice du corps d'outil (fig. 9.13).

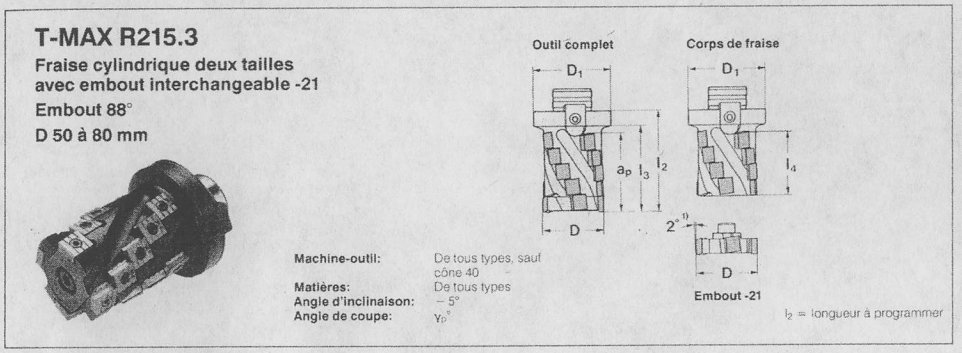


FIGURE 9.13 Fraises cylindriques deux tailles à plaquettes fixées en hélice. *Doc Sandvik-Coromant*

Elles sont normalisées (NF E 66-310) et définies par 7 symboles plus 2 optionnels et 1 complémentaire pour le fabriquant : les quatre premières lettres pour le type, les trois chiffres suivants pour les dimensions ; les deux chiffres optionnels pour l'arête de coupe (fig. 9.14).
Formes, dimensions et nuances de carbure des plaquettes pour équiper chaque fraise sont définies par les fabricants, en fonction du type d'usinage (surfaçage, dressage, rainurage).

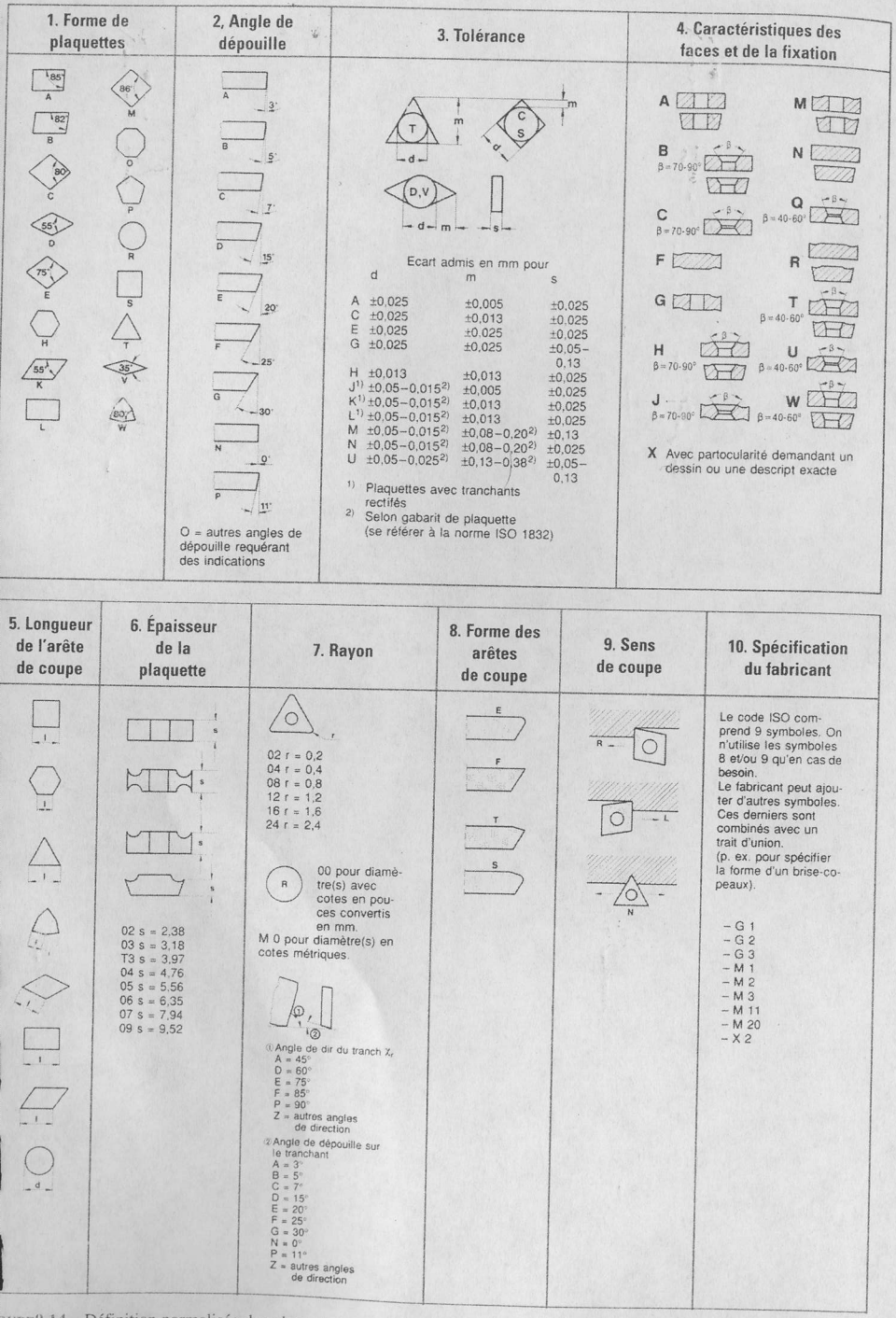


FIGURE 9.14 Définition normalisée des plaquettes en carbure. *Doc. Walter*

1.2 Vitesses d'avance

Elles sont indiquées en mm/dent et par tour (f_z).
La valeur des avances varie de quelques centièmes de mm à quelques dixièmes de mm (de 0,05 à 0,6 généralement) en fonction des conditions d'utilisation des fraises, de la vitesse de coupe et de la rigidité des outils (fig. 9.15 et 9.16).

Section du copeau

Avec la profondeur de passe *s*, on a : f_z. *s*.
La section maximale du copeau est conditionnée par : la puissance de la machine, la rigidité et le maintien de l'outil, l'angle d'engagement de la fraise (conditionnant le nombre de dents en prise dans la matière).

ELCO + TIN		Avance par dent en mm				
		Fraises d'ébauche		Fraises de finition		
Matière à usiner	Vitesse de coupe en m/min	⌀ 40 au ⌀ 100	⌀ 8 au ⌀ 50	⌀ 40 au ⌀ 100	⌀ 2 au ⌀ 50	⌀ 2 au ⌀ 20
Aciers jusqu'à 50 daN/mm²	40 à 60	0,06 à 0,12	0,02 à 0,13	0,08 à 0,13	0,002 à 0,18	0,003 à 0,08
Aciers de 50 à 70 daN/mm²	35 à 40	0,06 à 0,12	0,02 à 0,13	0,08 à 0,13	0,002 à 0,20	0,003 à 0,08
Aciers de 70 à 90 daN/mm²	25 à 35	0,07 à 0,11	0,02 à 0,13	0,10 à 0,13	0,002 à 0,20	0,003 à 0,08
Aciers de 90 à 120 daN/mm²	22 à 25	0,07 à 0,11	0,02 à 0,13	0,08 à 0,13	0,002 à 0,20	0,003 à 0,08
Aciers de plus de 120 daN/mm²	20 à 22	0,06 à 0,10	0,02 à 0,13	0,08 à 0,12	0,002 à 0,18	0,003 à 0,08
Fonte malléable < 160 HB	35 à 40	0,07 à 0,11	0,02 à 0,13	0,09 à 0,12	0,002 à 0,20	0,003 à 0,08
Fonte grise < 200 HB	25 à 35	0,07 à 0,11	0,02 à 0,13	0,10 à 0,13	0,002 à 0,20	0,003 à 0,08
Fonte grise > 200 HB	22 à 25	0,07 à 0,11	0,02 à 0,13	0,08 à 0,13	0,002 à 0,19	0,003 à 0,08
Aciers inoxydables	12 à 16	0,07 à 0,11	0,02 à 0,13	0,09 à 0,12	0,002 à 0,18	0,003 à 0,08
Aciers fortement alliés Alliages base nickel (Inconel)	7 à 11	0,06 à 0,11	0,02 à 0,13	0,09 à 0,10	0,002 à 0,21	0,003 à 0,08
Laitons et bronzes tendres	50 à 70	0,10 à 0,20	0,03 à 0,20	0,08 à 0,14	0,002 à 0,25	0,003 à 0,08

Les vitesses de coupe et avances par dent sont des valeurs indicatives.
L'avance par dent augmente de façon régulière suivant le diamètre de la fraise. La plus petite correspond à la fraise du plus petit diamètre et la plus grande correspond à la plus grosse fraise de notre gamme.
Pour les fraises à queue série longue l'avance doit être réduite d'environ 50 %.

FIGURE 9.15 Conditions de coupe indicatives de fraises en acier rapide recouvert de TIN. *Doc. Leclerc*

Données de coupe avec AP.T 0903.. pour F 3038

Correspondance ISO →			K10 à K25 M10 à M25		P25 à P45 M25 à M40		P20 à P40		P30 à P50		K5 à K15		K15 à K25		P35 à P40	
Matière à usiner			Nuances revêtues								Nuances non revêtues					
			WTA 21		WTA 51		WTA 61		WTL 71		WK 10		WKM		WP 40	
Groupe princip.	Description	Rm N/mm²	v_c m/min	f_z mm	v_c m/min	f_z mm	v_c m/min	f_z mm	v_c m/min	f_z mm	v_c m/min	f_z mm	v_c m/min	f_z mm	v_c m/min	f_z mm
A	Acier non ou faiblement allié Rm < 450 N/mm²	à 450			100 à 150	0,08 à 0,20	120 à 160	0,08 à 0,20	100 à 150	0,08 à 0,20					50 à 80	0,08 à 0,20
A	Acier allié et acier au carbure Rm 450–800 N/mm²	450 à 800			80 à 140	0,06 à 0,15	90 à 140	0,06 à 0,15	80 à 120	0,06 à 0,20					50 à 70	0,08 à 0,20
A	Acier trempé Rm 750–1100 N/mm²	750 à 1100			70 à 120	0,06 à 0,12	80 à 140	0,06 à 0,12	70 à 120	0,06 à 0,15					50 à 70	0,06 à 0,15
A	Acier à outils et à matrice Rm 1000–1500 N/mm²	1000 à 1500			70 à 90	0,04 à 0,08	70 à 100	0,04 à 0,08							50 à 60	0,06 à 0,10
A	Fonte aciérée non alliée et alliée Rm 500–850 N/mm²	550 à 850			80 à 140	0,08 à 0,15	90 à 150	0,08 à 0,15	80 à 120	0,08 à 0,12					60 à 80	0,10 à 0,15
R	Matière austenitique 150–275 HB	600 à 750			120 à 250	0,08 à 0,15	140 à 280	0,08 à 0,12	120 à 200	0,08 à 0,15					60 à 90	0,08 à 0,12
F	Fonte grise 180–250 HB		180 à 250	0,10 à 0,15	150 à 180	0,10 à 0,20	150 à 200	0,10 à 0,20	120 à 160	0,10 à 0,20	100 à 140	0,10 à 0,15	100 à 140	0,10 à 0,15		
F	Fonte grise nodulaire/ Fonte malléable 180–330 HB		130 à 160	0,10 à 0,15	100 à 150	0,10 à 0,20	120 à 160	0,10 à 0,15	100 à 140	0,10 à 0,15	60 à 100	0,10 à 0,15	60 à 100	0,10 à 0,15		
N	Matériaux non ferreux Al, Cu, etc.	350 à 450	160 à 400	0,08 à 0,12	150 à 300	0,08 à 0,12	150 à 300	0,08 à 0,12	140 à 350	0,08 à 0,12	160 à 350	0,08 à 0,12	160 à 350	0,08 à 0,12		
S	Alliages réfractaires base Ti-Ni-Co 130–280 HB	700 à 1200			40 à 70	0,04 à 0,08	50 à 80	0,04 à 0,10	40 à 70	0,04 à 0,10	30 à 50	0,04 à 0,06	30 à 50	0,04 à 0,06		
S	Alliages réfractaires base Ti 280–400 HB	700 à 1200			40 à 70	0,04 à 0,08	50 à 80	0,04 à 0,10	40 à 70	0,04 à 0,10	30 à 40	0,04 à 0,06	30 à 40	0,04 à 0,06		

Pour le fraisage en roulant, choisissez les valeurs f_z maxi, et pour le rainurage les mini.

FIGURE 9.16 Données de coupe de fraises à plaquettes carbure. *Doc Walter*

1.3 Vitesses de coupe

Elles sont fonction, en particulier, de la nature des matériaux outil et pièce.
Ces vitesses correspondent à l'utilisation des fraises pour une durée de vie d'outil économique, les arêtes étant soumises à des contraintes dues à la coupe intermittente et à la variation d'épaisseur du copeau en particulier.
Prépondérantes dans la durée de vie d'outil, elles varient de quelques m/min à plusieurs centaines de m/min (fig. 9.15 à 9.16).

1.4 Choix des vitesses de coupe et d'avance

Des tableaux de fabricants de fraises indiquent des vitesses de coupe et d'avance en fonction des matériaux à usiner, pour une utilisation stable (absence de vibrations...) (fig. 9.15 et 9.16).
Utilisation éventuelle instable de la fraise (pièce déformable sous les efforts...) et fraises à plaquettes carbure brasées ou monoblocs carbure : réduire les vitesses (coupe et avance) indiquées de 10 à 30 % si nécessaire, pour ne pas détériorer l'outil.
Travaux d'ébauche, avec des fraises de grandes dimensions et dans des conditions stables d'utilisation : choisir la plus grande avance indiquée.
Travaux de surfaçage-dressage. Choisir de grandes avances.
Travaux de rainurage. La fraise travaille en pleine matière : choisir la plus faible avance proposée et particulièrement si le diamètre de fraise est faible.
Plages d'avances indiquées. L'avance sera choisie minimale en utilisation avec la vitesse de coupe maximale proposée, et inversement.
Fraises à plaquettes carbure. L'avance sera choisie en principe, la plus grande indiquée, la coupe intermittente des arêtes provoquant, en particulier, l'écaillage et l'effondrement d'arête (fig. 9.17).
Fraises affutables. À plaquettes carbure brasées ou monoblocs, en acier rapide : l'avance sera choisie relativement faible.
Production de grande série. On pourra définir une durée de vie d'outil à production maximale.

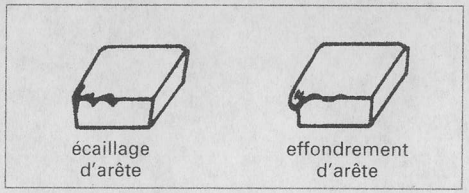


FIGURE 9.17 Formes d'usure des plaquettes carbure en fraisage.

1.5 État de surface

Il dépend, et particulièrement en surfaçage : de la rigidité du couple machine et outil/pièce et porte-pièce ; de la géométrie de la fraise (avec plat ou rayon de bec ; d'un saut axial des plaquettes dû à la fixation ou/et une usure localisée) ; d'un écoulement insuffisant des copeaux occasionnant des défauts de rugosité (R, Ra) et en particulier d'ondulation (W).
Il importe de mesurer un état de surface fraisé, sur une longueur supérieure à l'avance par tour f_z. n de la fraise.

Biseau plan ou plat de bec. Sur toutes les plaquettes, de valeur au moins égale à l'avance par tour de fraise ($b\epsilon \geq f_z$) : obtention d'un meilleur état de surface en surfaçage (si cela n'occasionne pas de vibrations).

Surfaçage de matériaux à copeaux courts (fontes...) Possibilité d'équiper les fraises à surfacer d'une plaquette à biseau plat (plaquette de planage) de longueur supérieure à l'avance par tour, dépassant sensiblement en hauteur les autres plaquettes (0,02 à 0,1 mm) : réduction des défauts d'ondulation.

Le plat légèrement bombé évite de produire des « dents de scie » sur la surface fraisée (fig. 9.18).

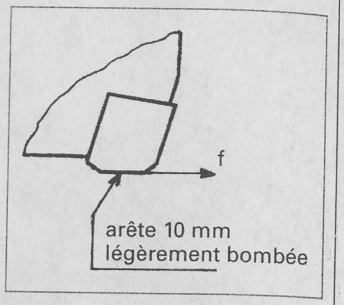


FIGURE 9.18
Schéma de plaquette carbure de planage.

1.6 Puissance nécessaire à la coupe P_w

Elle est déterminée, avec une approximation suffisante, en considérant essentiellement l'effort de coupe tangentiel F_t.

La puissance absorbée par la machine P_u est généralement la contrainte limitant la section des copeaux (fig. 9.19), d'où la formule (d'après Sandvick Coramant) :

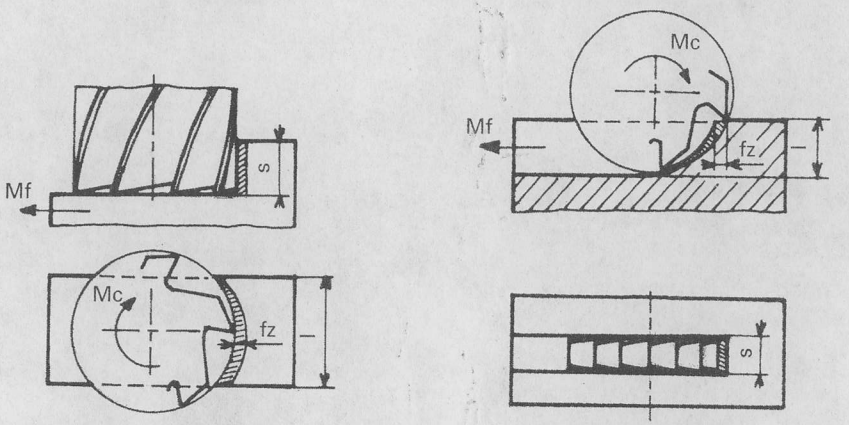
$P_u = s.\ l.\ n.\ z.\ f_z.\ Ka/6120.\eta$, avec :

P_u = Puissance utile, en watts
s = profondeur de passe, en mm
l = engagement de la fraise dans la pièce, en mm
n = fréquence de rotation de la fraise, en tr/min
z = nombre de dents de la fraise
f_z = avance par dent, en mm/tour
K_a = effort spécifique de coupe, en N/mm², à corriger éventuellement pour γ_0
η = rendement de la machine.

Correction pour angle de coupe γ_0 : cet angle agissant sur l'effort spécifique de coupe K_a, apporter une correction de 1,5 % par degré à K_a, en moins pour γ_0 positif et en plus pour γ_0 négatif, par rapport à $\gamma_0 \cong 7°$, avec e_m = 0,2 mm (tableau fig. 9.19).

Correction par épaisseur moyenne du copeau e_m : appliquer le facteur de correction C_e (tableau fig. 1.19).

Nota : la puissance nécessaire à la coupe dépend en particulier de : matériau pièce, épaisseur du copeau, angle de coupe. La vitesse de coupe est secondaire, sauf à faible vitesse.



Surfaçage-dressage

Rainurage

Type de matière		Dureté HB	Ka moyen
Acier au carbone	C 0,15 %	125	275
	C 0,35 %	150	300
	C 0,70 %	250	330
Acier faiblement allié	recuit	125–200	320
	trempé	200–450	390
Acier fortement allié	recuit	150–250	350
	trempé	250–500	410
Acier inoxydable	ferritique	175–225	360
	austénitique	150–200	390
Acier coulé	non allié	225	260
	faiblement allié	150–250	280
	fortement allié (P. ex. inoxydable)	150–300	320
Acier extra-dur		>50 HRC	675
Fonte malléable	à copeaux courts	110–145	220
	à copeaux longs	200–250	200
Fonte grise	faible résistance	150–225	140
	haute résistance et alliée	200–300	180
Fonte nodulaire	ferritique	125–200	150
	perlitique	200–300	225
Fonte trempée en coquille		40–60 HRC	475

Efforts spécifiques de coupe (pour copeau de 1 cm²) avec e_m = 0,2 mm et γ_0 –7°. *Doc. Sandvik-Coromant*

em	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00
ce	1,50	1,23	1,10	1,00	0,94	0,89	0,85	0,81	0,79	0,76	0,72	0,69	0,66	0,64	0,62

Facteurs de correction C_e pour épaisseurs moyennes de copeaux. *Doc. Sandvik-Coromant*

FIGURE 9.19 Forme des copeaux produits en fraisage.

2. Surfaçage - dressage

2.1 Généralités

Surfaçage. Fraisage d'une surface plane perpendiculaire à l'axe de l'outil-fraise à surfacer (fig. 9.20).

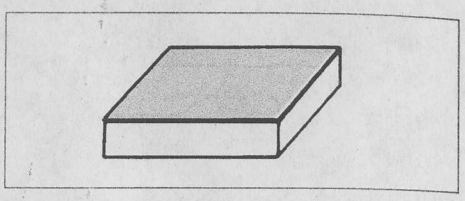


FIGURE 9.20
Plan fraisé en surfaçage.

Surfaçage-dressage. Fraisage simultané de deux surfaces, perpendiculaire et parallèle à l'axe de l'outil-fraise à surfacer-dresser (fig. 9.21).

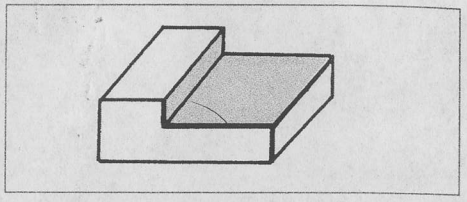


FIGURE 9.21
Plans perpandiculaires fraisés en surfaçage-dressage.

2.2 Fraises à surfacer

Fraises une taille dont la profondeur de passe est limitée par la longueur d'arête des plaquettes.
Leurs diamètres nominaux varient de 32 à 630 mm, et généralement entre 50 et 500 mm.
Le corps d'outil supporte des plaquettes indexées, et également pour les grands diamètres, des cartouches interchangeables (fig. 9.22).
Sa mise en position et fixation s'effectue à l'aide d'un mandrin porte-fraise ; à partir du diamètre 160 mm, avec centreur et fixation au nez de broche de la fraiseuse (fig.9.22).
L'angle de direction d'arête K_r de ces fraises varie de 45° ; 60° ; 75° ; 90° ; 0 à 90° pour les plaquettes rondes.
L'angle de coupe γ_0 est généralement positif.

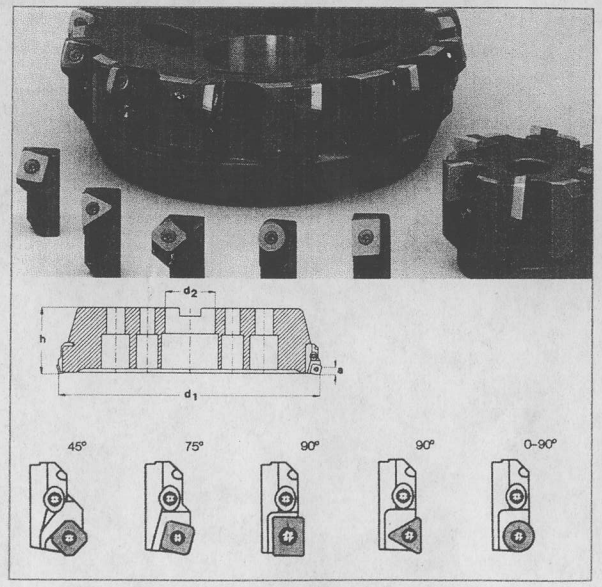
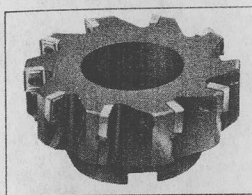


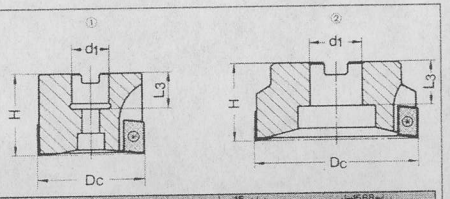
FIGURE 9.22 Fraise à surfacer à cartouches interchangeables.
Doc. Kenamétal

2.3 Fraises à surfacer-dresser

Fraises avec arêtes de coupe parallèles à l'axe du corps d'outil pour dressage d'une face perpendiculaire au surfaçage (fig. 9.23).
Les fraises longues sont couramment appelées fraises deux tailles (bien qu'elles coupent essentiellement en périphérie).
Leurs diamètres nominaux varient de 20 à 160 mm, et généralement de 20 à 80 mm.
Leur mise en position et fixation est assurée dans la broche de la fraiseuse, à l'aide d'un mandrin porte-fraise.
Angle de direction d'arête K_r. Il est de 90°, les arêtes de coupe étant situées sur un corps cylindrique pour produire deux surfaces perpendiculaires.
Arêtes de coupe et goujures de dégagement des copeaux. Généralement hélicoïdales (angle d'inclinaison d'arête λ_s) pour attaque progressive des arêtes de coupe : fraises en acier rapide monobloc et lames de carbure brasées ; plaquettes en carbure fixées sur les hélices (fig. 9.23).
Brise-copeaux. Fraises hérissons ou monobloc. Sur la denture hélicoïdale, pour fragmenter les copeaux et favoriser leur évacuation en fraisage à gros débit (fig. 9.24 et 9.25).
Fraise hérisson. Fraise à plaquettes caractérisée par une denture hélicoïdale discontinue (deux arêtes de coupe assurent une coupe complète avec état de surface de finition) : permet un gros débit de copeaux même pour machine peu puissante.

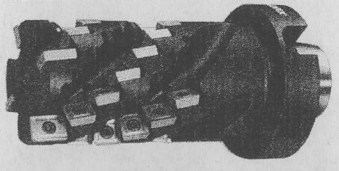


Fraise à surfacer-dresser

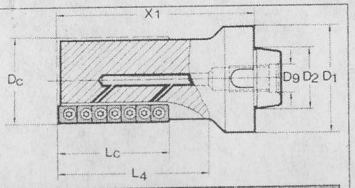


Désignation	Dc mm	d_1 mm	H mm	L_3 mm	Nb. de dents	Poids kg	No. de cde (15 / 9,52)	No. de cde (15,88 / 12,7)
F 2042.0.22.040.050	50	22	40	20	5	0,45	222328-727	
① F 2042.0.22.040.063	63	22	40	21	6	0,75		222329-727
F 2042.0.27.050.080	80	27	50	28	6	1,25		222330-727
F 2042.0.32.050.100	100	32	50	28	8	1,75		222331-727
② F 2042.0.40.063.125	125	40	63	30	10	3,00		222332-727

FIGURE 9.23 Fraises à surfacer-dresser.
Doc. Walter

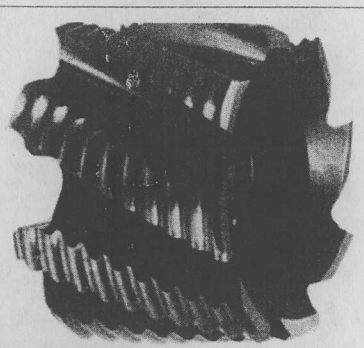


Fraise hérisson à surfacer-dresser



Désignation	Dc mm	D_1 mm	D_2 mm	D_9 mm	L_4 mm	Lc mm	X_1 mm	Rangées de dents	Plaquette amovible, pourtour quantité	Plaquette amovible, face avant, quantité	Poids kg	No. de cde (127 / 15,88 / 12,7)
F 2038 MF 0.080.135.50	50	80	44,45	M20	86	65	135	3	15	3	2,5	287172-737
F 2038 MF 0.080.135.63	63	80	44,45	M20	112	75	135	4	24	4	2,7	287174-737
F 2038 MF 0.080.155.80	80	80	44,45	M20	135	95	155	5	40	5	3,7	287176-737

FIGURE 9.24 Fraises hérissons à surfacer-dresser deux tailles.
Doc. Walter



Diamètre D - js 16	Hauteur H	Diamètre alésage d - H7	Nombre de dents Z
40	32	16	6
50	36	22	6
63	40	27	8
80	45	27	8
100	50	32	10

Fraise 2 tailles à défoncer

FIGURE 9.25 Fraise d'ébauche monobloc. *Doc. Leclerc*

2.4 Mise en œuvre du surfaçage-dressage

Diamètre de la fraise

Il devrait être au moins égal à 1,2 de la largeur de la fraise (fig. 9.26).
Décaler sensiblement l'axe de la fraise par rapport à la surface à usiner, du côté de l'attaque des dents, afin que :
– plusieurs arêtes de coupe soient en prise simultanée dans la matière ;
– la résultante des forces de coupe radiales appliquées à l'outil maintienne la broche en précontrainte dans une direction, évitant des vibrations.

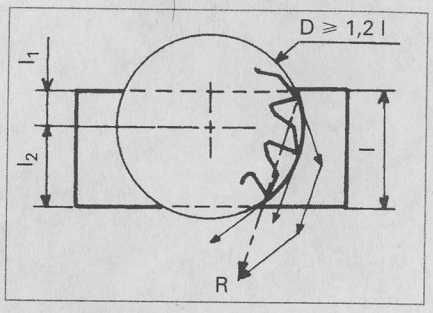


FIGURE 9.26 Diamètre et position fraise en surfaçage sur machine à CN.

Nombre de plaquettes de coupe

Pour un diamètre de fraise donné, choisir :
Un nombre maximum. Fraise à pas réduit, en surfaçage des pièces à parois minces : pour avoir au moins deux dents en prise simultanément ; et utiliser de faibles avances avec décalage de l'axe de la fraise (fig. 9.27).
Un nombre minimum. Fraise à grand pas en surfaçage à forte avance de surfaces larges : pour avoir un grand logement inter-dents de copeaux et réduire les vibrations (en réduisant le nombre de dents en prise).
Un nombre intermédiaire. Fraise à pas normal en surfaçage de matériaux à risque d'effritement (fontes...) et avec une avance moyenne.

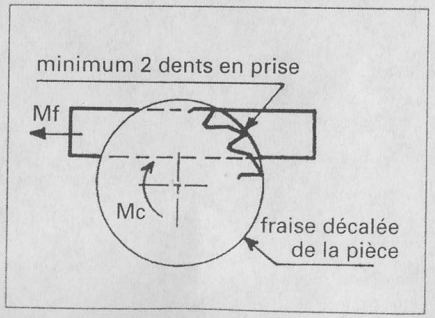


FIGURE 9.27 Surfaçage d'une surface étroite.

Production optimisée. Éventuellement, utiliser des fraises à pas différentiel (inter-dents périodiquement différents) permettant de réduire les vibrations par l'irrégularité de fréquence des résonances du couple machine et outil/pièce et porte-pièce (fig. 9.28).
Plaquettes rondes. Obtention, en surfaçage, d'un bon état de surface, et avec des avances élevées (plaquettes robustes et résistantes avec vibrations) (fig. 9.29).
Utilisation : en ébauche avec un taux d'enlèvement de matière élevé ; fraisage de matériaux très durs.

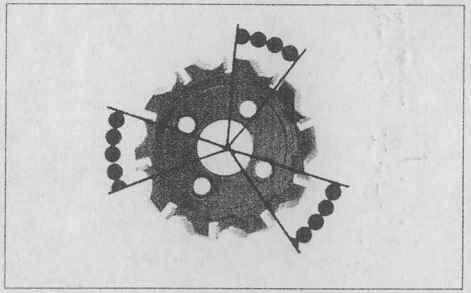
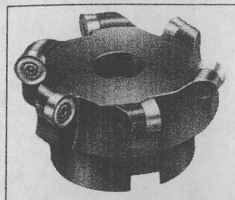
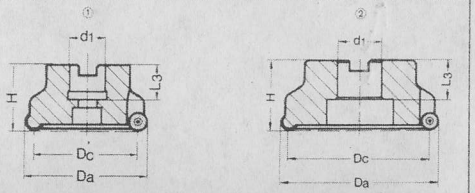


FIGURE 9.28 Fraise trois tailles à pas différentiel. *Doc. Sandvik Coromant*



Fraise à surfacer à plaquettes rondes



Désignation	Dc mm	Da mm	d_1 mm	H mm	L_3 mm	Nb. de dents	Poids kg	No. de cde
F 2034.0.22.040.040	40	52	22	40	21	4	0,36	222339-727
F 2034.0.22.040.050	50	62	22	40	21	5	0,40	222340-727
F 2034.0.22.040.063	63	75	22	40	21	6	0,60	222341-727
F 2034.0.27.050.080	80	92	27	50	28	6	1,30	222342-727
F 2034.0.32.050.100	100	112	32	50	28	7	2,00	222343-727
F 2034.0.40.063.125	125	137	40	63	30	7	3,80	222344-727

FIGURE 9.29 Fraise à surfacer à plaquettes rondes. *Doc. Walter*

Angle de coupe γ_0

Choisir γ_0 positif pour limiter la puissance nécessaire à la coupe, la stabilité du couple outil/pièce porte-pièce.
Fraisage des matériaux pouvant provoquer l'usure des arêtes de coupe par arête rapportée (aciers inoxydables, à faible teneur en carbone).
Choisir γ_0 négatif pour : usinage de la fonte, évitant l'effritement à l'attaque des arêtes de coupe ; des matériaux difficilement usinables par leur dureté ; le fraisage très discontinu provoquant des chocs fréquents sur les becs d'outil.

Angle de direction d'arête κ_r

Pour une avance fz, l'épaisseur du copeau diminue si κ_r diminue, réduisant la pression de coupe sur les plaquettes (fig. 9.30) : choisir κ_r = 45 à 75° en surfaçage de pièces rigides.
Pour κ_r = 90°, la force axiale est réduite au minimum : à choisir en surfaçage de pièces minces pour éviter un fléchissement (fig. 9.30).
Matériaux à risque d'effritement à l'attaque (fontes...) : choisir κ_r = 45°
Matériaux ayant tendance au collage sur la face de coupe (aciers inoxydables, titane, aciers extra-doux) : choisir κ_r = 90° (et γ_0 positif).

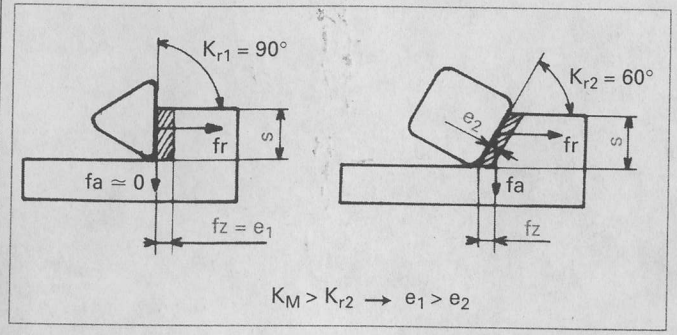
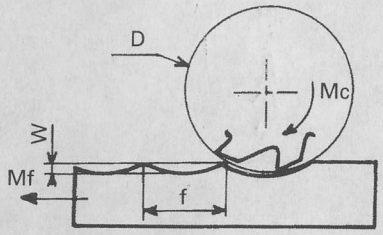


FIGURE 9.30
Épaisseurs des copeaux en fonction de Kr.



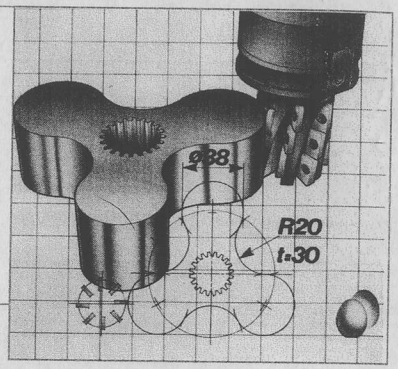


FIGURE 9.31 État de surface macrogéométrique et opération de fraisage de profil.

Doc. Sandvik Coromant«Le monde de l'usinage».

Dressage de face

La fraise travaille « en roulant » sur la surface à obtenir : l'ondulation de surface dépendra du « saut » éventuel de dents.
Éviter tout saut de dents, par la rigidité outil-porte outil.
Théoriquement, l'ondulation obtenue par le saut d'outil dépend du diamètre de fraise et de l'avance par tour, ce qui donnerait $W = f^2/4D$ (fig. 9.31).

3. Rainurage

3.1 Généralités

Fraisage simultané de trois surfaces (deux surfaces parallèles et une qui leur est perpendiculaire) éventuellement quatre surfaces, avec les outils-fraises à rainurer (fig. 9.32).
On utilise les fraises à rainurer à queue, en T, trois tailles, scie.

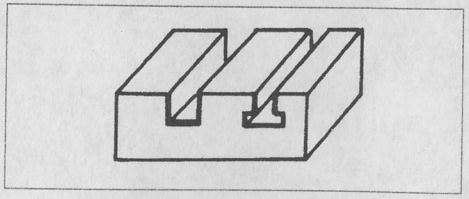


FIGURE 9.32 Surfaces associées obtenues en rainurage.

3.2 Fraises à rainurer à queue

La coupe peut s'effectuer également en bout, sur une faible profondeur (maximum 0,5 du diamètre) : prise de passe en pleine matière, en plongée ou en oblique (fig. 9.33).
Fraises monoblocs (acier rapide, carbure, coronite) à queue cylindrique de petits diamètres (maxi = 12 mm) avec 2 à 4 dents.

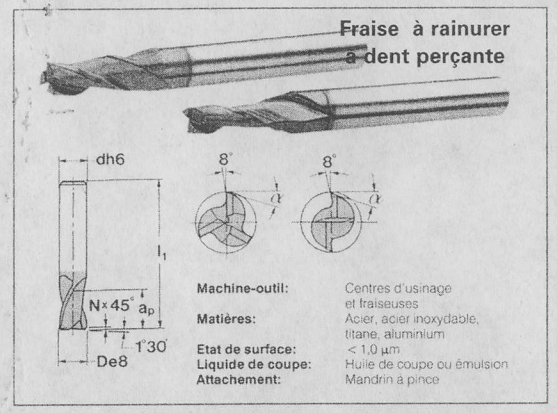


FIGURE 9.33
Fraises à rainurer monoblocs à dent perçante en coronite.
Doc. Sandvik Coromant

3.3 Fraises à rainurer coupe centrale, à queue, ou à rainurer-plonger ou à dent perçante

Utiliser pour fraisage de rainures avec prise de passe en plongée, perçage-lamage à fond plat (fig. 9.34 et 9.35).
Leurs diamètres nominaux varient de : 2 à 63 mm pour les fraises monoblocs (en acier rapide, avec deux dents et en coronite de Sandvik avec quatre dents) ; de 12 à 40 mm pour les fraises à plaquettes indexées (en carbure métallique avec ou sans rayon de bec, (ou rondes) de une à trois dents selon les diamètres.
Goujures de dégagement de copeaux. Droites pour les fraises en carbure ; hélicoïdales pour les fraises monoblocs.
Mise en position fixation. Elle s'effectue par la queue du corps d'outil (cylindrique, filetée, conique, selon les diamètres).

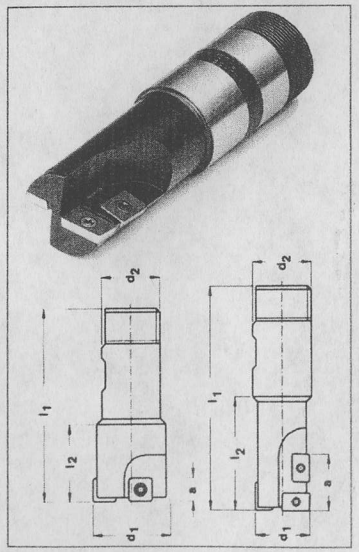


FIGURE 9.34 Fraise à rainurer à plaquettes et dent perçante. *Doc. Kénnamétal*

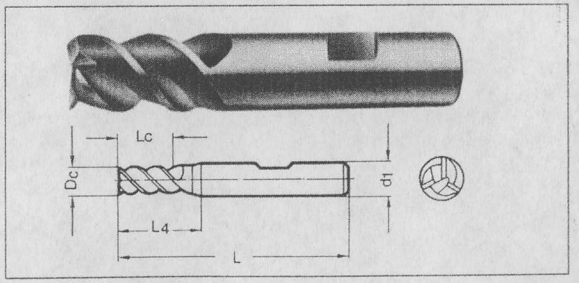


FIGURE 9.35 Fraise à rainurer à dent perçante, en carbure monobloc. *Doc. Walter*

9

3.4 Fraises à rainurer en T

Elles sont de type trois tailles (la coupe s'effectue en périphérie et avec les deux faces latérales (fig.9.36).
Utilisation après fraisage de la rainure supérieure, pour l'obtention de rainures normalisées.
La denture est généralement à coupe alternée sur les deux faces.
La mise en position-fixation s'effectue par la queue du corps d'outil (cylindrique, filetée).
Leurs diamètres varient : de 11 à 95 mm pour les fraises monoblocs (en acier rapide) ; de 21 à 50 mm pour les fraises à plaquettes indexées en carbure métallique.

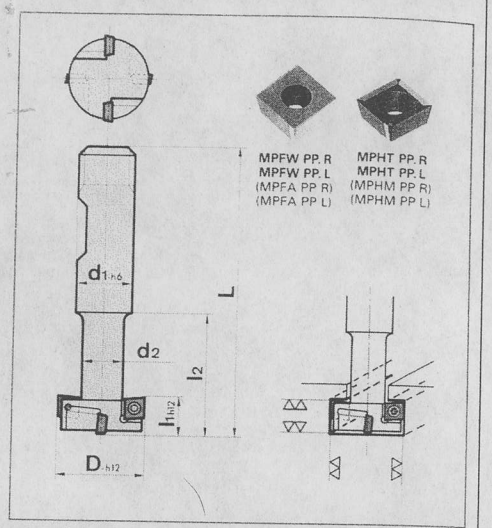


FIGURE 9.36
Fraise à rainurer en T à plaquettes carbure.
Doc. Stellram

3.5 Fraises à rainurer trois tailles, ou fraises-disques

La coupe s'effectue en périphérie et avec les arêtes de coupe situées sur les faces latérales (fig. 9.37), en fraisage pleine matière sous forte avance.
Leurs diamètres nominaux varient généralement de 125 à 250 mm.
La mise en position-fixation s'effectue par un alésage et clavetage ou moyeu et tenon à monter sur arbre ou mandrin porte-fraise.
La denture est généralement alternée sur les faces latérales.
La largeur de coupe est réglable pour fraises à plaquettes ou cartouches porte-plaquette.

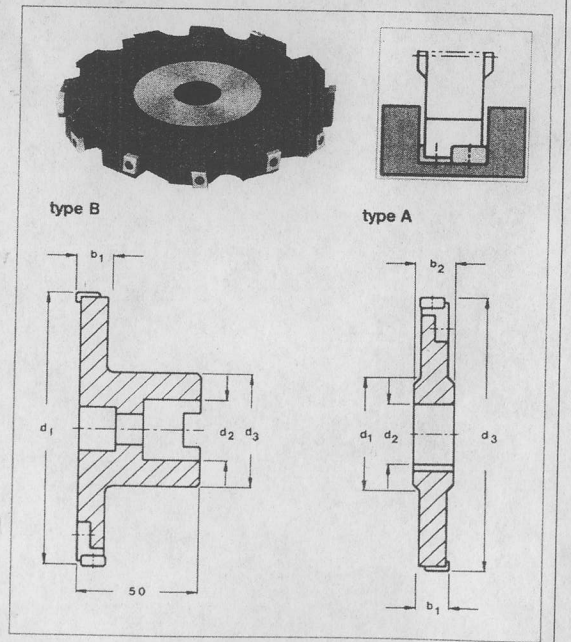


FIGURE 9.37
Fraise à rainurer trois tailles à plaquettes carbure et largeur de coupe réglable.
Doc. Kénamétal

3.6 Fraises à rainurer pour clavettes disques (woodruff)

Fraises à queue une taille à denture alternée, largeur calibrée e8 de 2,5 à 10 mm (outils Leclerc) (fig. 9.38).

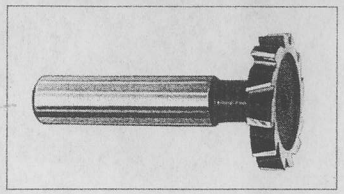


FIGURE 9.38
Fraise à rainurer pour clavette disque monobloc.
Doc. Leclerc

3.7 Fraises-scies

De type à rainurer trois tailles utilisées pour : tronçonnage, fraisage de rainures étroites, ébauche de dentures.
Fraisage de l'ensemble des matériaux usinés, sous fortes avances avec une précision de 0,2 mm.
Leurs diamètres varient de 80 à 315 mm et les épaisseurs de 6 à 13 mm pour les fraises-scies à plaquettes indexées en carbure métallique ; pour les fraises-scies monoblocs (acier rapide), leurs diamètres varient de 80 à 250 mm et les épaisseurs de 1 à 6 mm.
Leur faible épaisseur les rend sensibles aux efforts axiaux.
La mise en position est assurée par alésage et clavetage ou moyeu et tenon, sur arbre ou mandrin.

Fraises-scies en acier rapide

Elles ont différentes dentures (droite, Acmée, Heller...) (voir chapitre « Procédés de découpe »).
La denture Heller est productive avec les dents alternées (droites hautes chanfreinées et basses de quelques dixièmes de mm) : évite les risques de bourrage et diminue l'effort de coupe (fig. 9.39).

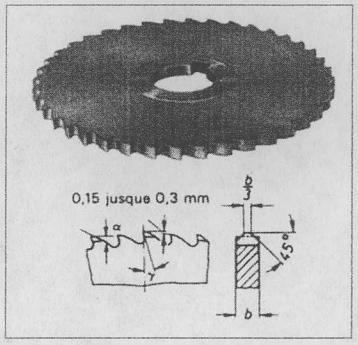


FIGURE 9.39
Fraise-scie monobloc
Doc. Leclerc

Fraises-scies en carbure métallique

La coupe est alternée, chaque plaquette coupant en périphérie d'un seul côté.
La largeur de coupe est réglable (fig. 9.40).

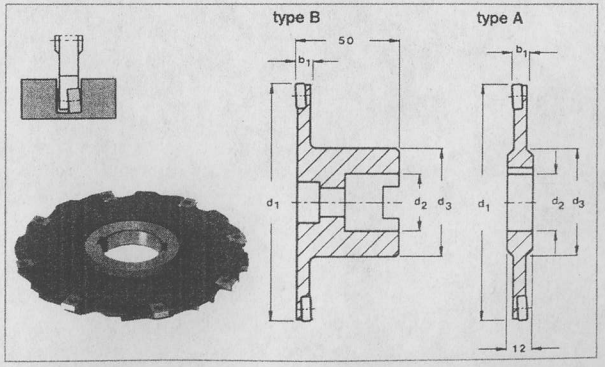


FIGURE 9.40
Fraise-scie à plaquettes carbure et largeur de coupe réglable.
Doc. Kénamétal

3.8 Mise en œuvre du rainurage

Le type de fraise à utiliser varie en fonction de : la quantité de matière à enlever, la forme de pièce (rigidité, dégagement d'outil, fixation).

Rainurage avec fraise-disque

Réalisation des rainures profondes en une seule passe. L'outil peut être maintenu, complémentairement à l'extrémité de son arbre porte-fraise (gros débit).
Choisir les vitesses d'avance maximales indiquées dans les tableaux des fabricants.
Utiliser une fraise-disque d'un diamètre assurant au moins deux dents en prise simultanée, (cas du rainurage de faible profondeur), l'engagement de fraise étant réduit.
Choisir la denture alternée avec dents à inclinaison d'arête : réduction des contraintes à l'attaque des dents.

Rainures en train de fraises

Un volant d'inertie de grand diamètre atténue les vibrations causées par l'intermittence des attaques de dents (fraises en carbure à grand pas de dentures) (fig. 9.41).
Un palier supplémentaire, éventuellement, assure la stabilité du couple outil/porte-pièce.
Décaler angulairement, si possible, les fraises entre elles pour limiter les vibrations par attaque des dents.

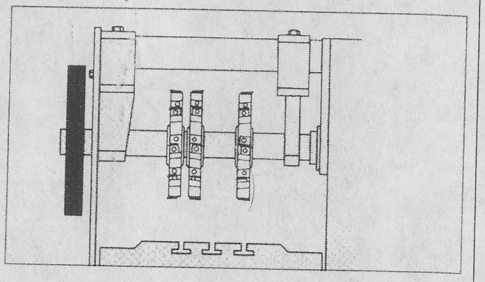


FIGURE 9.41 Train de fraises-disques montées avec volant d'inertie et palier support.
Doc. Sandvik Coromant

Lubrification

Impérative en rainurage profond pour éviter le bourrage des copeaux dans les inter-dents.
Par jet d'air pour fraise carbure, évacuation des copeaux.
Par jet de lubrifiant, pour fraise en acier rapide, évacuation des copeaux et réfrigération.

Rainurage avec fraise à queue

Réalisation des rainures peu profondes en une ou plusieurs passes, avec des vitesses d'avance à choisir minimales, en particulier pour les petits diamètres, dans les tableaux des fabricants.

Profondeur de passe

Elle dépend de la rigidité du couple outil/porte-outil et du diamètre de fraise.
On admet une profondeur de passe maximale égale à : 1/2 diamètre pour petites fraises et un diamètre pour grosses fraises.
Arc d'engagement de l'outil Ψ proche de 180° (fig. 9.42).

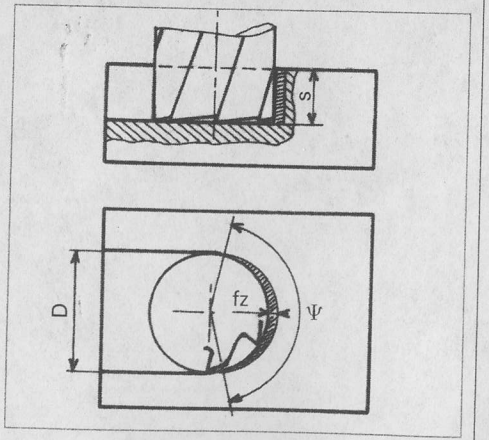


FIGURE 9.42
Engagement de la fraise en rainurage.

Denture hélicoïdale. Évite le travail au choc, par l'attaque progressive des dents dans la matière (fig. 9.43).

Désignation	D_C mm	Queue	X_1 mm	X_2 mm	L_C mm	Z	kg	Nb. de plaq.	Type
F 3038.M.020.Z01.24	20	CM 2	50	114	24	1	0,2	4	AP . T 0903 . .
F 3038.M.025.Z02.32	25	CM 2	55	119	32	2	0,3	8	AP . T 0903 . .
F 3038.M.032.Z03.40	32	CM 3	70	151	40	3	0,7	15	AP . T 0903 . .
F 3038.M.040.Z03.56	40	CM 4	90	192,5	56	3	1,4	21	AP . T 0903 . .

FIGURE 9.43
Fraise à rainurer à plaquettes sur hélice (hérisson)
Doc. Walter

Rainurage en pleine matière

Utiliser des fraises à coupe centrale (une dent en bout, allant jusqu'à l'axe de l'outil, est perçante : prise de passe en plongée).

4. Fraisage de profils

4.1 Généralités

Fraisage de profils courbes, avec des trajectoires multidirectionnelles de formes d'intérieur et d'extérieur, débouchantes ou non, avec des fraises à bout sphérique (à copier) ou rayonné (à détourer) (fig. 9.44).

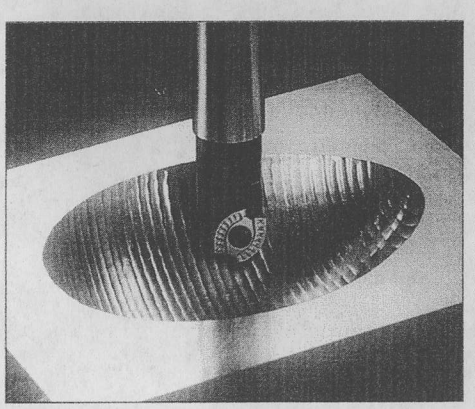


FIGURE 9.44
Opération de fraisage de profil (surface concave) avec fraise à bout sphérique.
Doc. Sandvik Coromant

4..2 Fraises à copier ou hémisphériques

À denture hélicoïdale droite ou inclinée (plaquettes rapportées) avec une arête de coupe allant jusqu'au centre, pour la prise de passe en plongée dans la matière et le suivi de profils courbes (fig. 9.44 et 9.45).

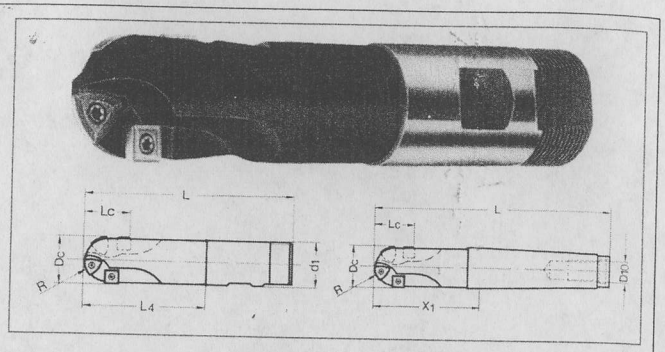


FIGURE 9.45
Fraise à copier à plaquettes carbure.
Doc. Walter

Leurs diamètres varient de : 10 à 50 mm pour les fraises à plaquette(s) indexée(s) en carbure métallique ; de 5 à 25 mm, en général, pour les fraises monoblocs en acier rapide.
La mise en position-fixation est assurée par queue (cylindrique, Morse, Varilock...).

4.3 Fraises à détourer, ou en bout à plaquettes rondes

Fraisage de formes réglées, débouchantes ou non, en usinage d'extérieur et d'intérieur (en particulier) avec prise de passe en plongée dans la matière (quelques mm au maximum) (fig. 9.46 et 9.47).
Elles sont à plaquettes rondes indexées, avec des diamètres extérieurs variant de 12 à 40 mm généralement, en position-fixation par queue (cylindrique ou conique).
Nota : diamètre nominal : entraxe des plaquettes (surface plane maximale fraisée en bout).

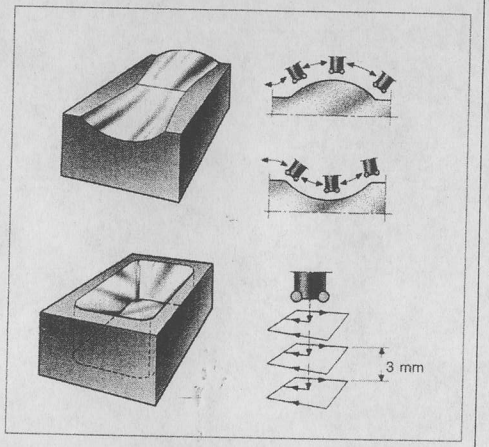


FIGURE 9.46
Opérations de détourage avec fraises à plaquettes rondes.
Doc. Sandvik Coromant

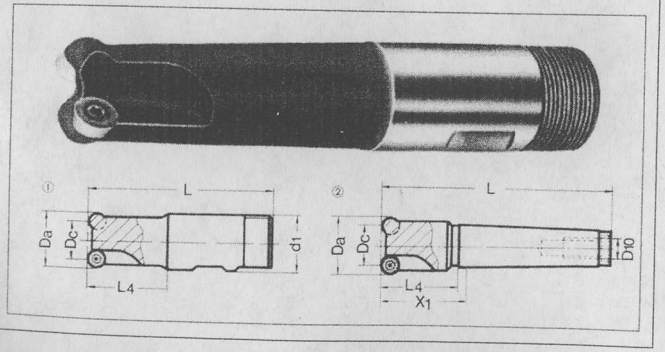


FIGURE 9.47
Fraises à détourer à plaquettes rondes.
Doc. Walter

Utilisation

En ébauche dans des matériaux difficiles à usiner (matrices, moules...) avec important enlèvement de matière (mise en position-fixation par alésage pour fraises ∅ 35 à 90 mm).
Leurs diamètres nominaux varient de 25 à 50 mm avec une ou deux plaquettes indexées en carbure métallique.
La mise en position-fixation est assurée par attachement à queue conique (Varilock et Weldon/Whistle Notch permettant le réglage axial).
Matériaux tendres. Ébauche avec fraises à détourer spécifique (de conception Sandvick) : important enlèvement de matière à grande vitesse de coupe et prise de passe combinée avec l'avance (pente de 15°) (fig. 9.48).

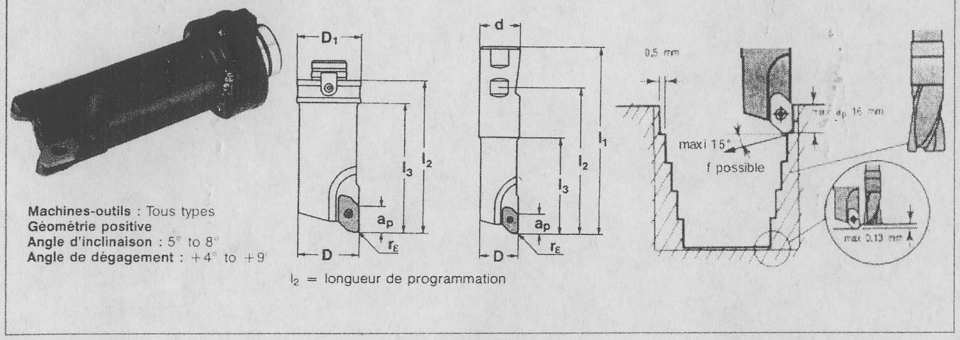


FIGURE 9.48 Fraises à détourer pour matériaux tendres et phase d'usinage. *Doc. Sandvik Coromant*

9

5. Fraisage de forme

5.1 Généralités

Fraisage de formes données avec des fraises conçues au profil à obtenir.
Les fraises utilisées, monoblocs (acier rapide) ou à plaquettes carbure, sont des types 2 tailles, 3 tailles, à queue.
La mise en position-fixation s'effectue par alésage ou à queue (cylindrique, conique).

5.2 Fraises concaves

De types 3 tailles et à queue (fig. 9.49).
Les fraises concaves type 3 tailles ont un profil en demi-cercle ou quart de cercle (à gauche ou à droite).

Leurs diamètres nominaux sont généralement de 63 à 100 mm.
Les fraises concaves type à queue (au profil 1/4 de cercle) ont des diamètres nominaux de 6 à 20 mm.

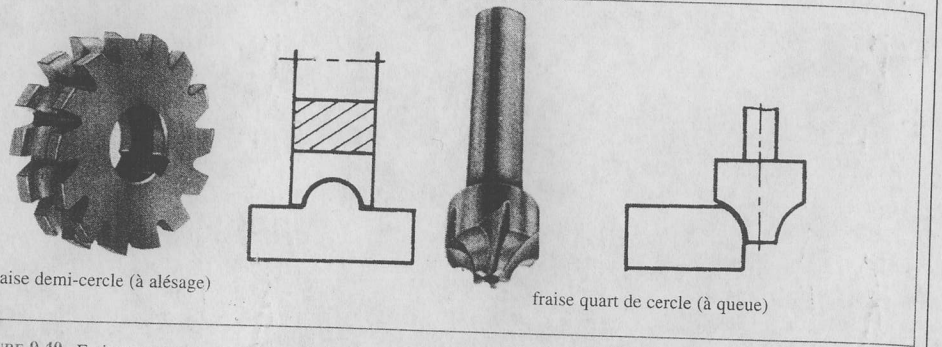


FIGURE 9.49 Fraises concaves et schéma d'usinage.
Doc. Leclerc

5.3 Fraises convexes

Du type 3 tailles, au profil en quart de cercle, pour des diamètres nominaux de 63 à 100 mm (fig. 9.50).

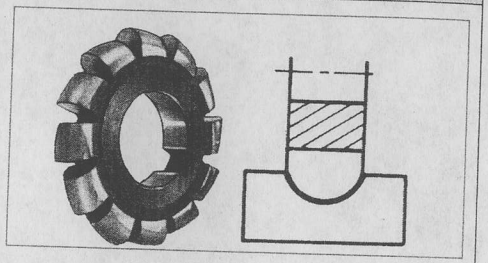


FIGURE 9.50
Fraise convexe demi-cercle à alésage et schéma d'usinage.
Doc. Leclerc

5.4 Fraises coniques

De type 2 tailles et à queue (fig. 9.51).
Les fraises coniques type 2 tailles ont des angles de pointe ϵ_r = 45°, 60°, 65°, 70°, 75°.
La mise en position-fixation s'effectue par alésage.
Les fraises coniques à queue sont de petits diamètres, d'angle de conicité généralement de 90°.

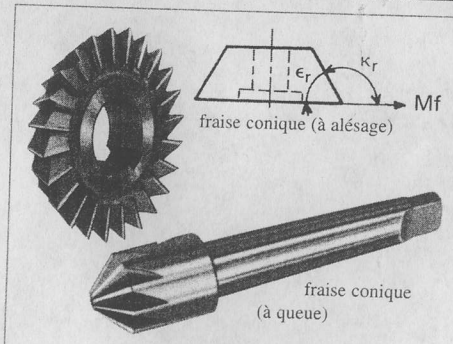


FIGURE 9.51
Fraise coniques.
Doc. Leclerc

5.5 Fraises à fileter

Pour réaliser des filetages par interpolation circulaire (voir chapitre « Procédés de filetage »).
Les fraises sont à 1 ou 2 plaquettes (carbure) indexées pour fileter à un pas et un profil donnés (selon plaquettes) tous diamètres, d'extérieur et d'intérieur, à droite ou à gauche, de la longueur de plaquettes.

5.6 Fraises à chanfreiner

Pour réaliser des chanfreins : circulaires (avant et arrière des alésages), rectilignes ou quelconques de faces par contournage des profils à suivre.
Les fraises sont à plaquettes indexées (1 à 4) en carbure métallique, avec des angles de direction d'arête Kr = 30, 45, 60° (fig. 9.52).
Leurs diamètres nominaux varient de 10 à 63 mm.
La mise en position-fixation s'effectue par alésage ou à queue.

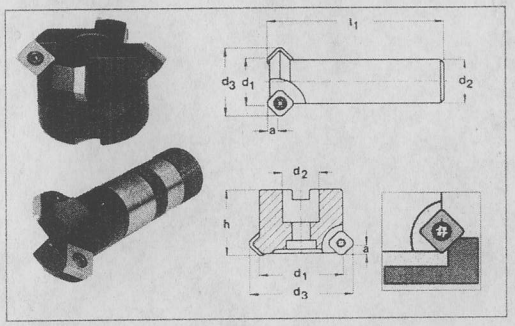


FIGURE 9.52
Fraises à chanfreiner.
Doc. Kénamétal

5.7 Fraises à gorge (de circlips...)

Pour réaliser des gorges, en interpolation circulaire (fig. 9.53).
Les fraises sont à plaquettes indexées en carbure métallique (de largeur correspondante aux standards des gorges : 1,1 à 3,15 H 13, pour alésages ∅ 18 à 100).
Elles sont à coupe périphérique avec une ou plusieurs plaquettes carbure, selon leurs diamètres.

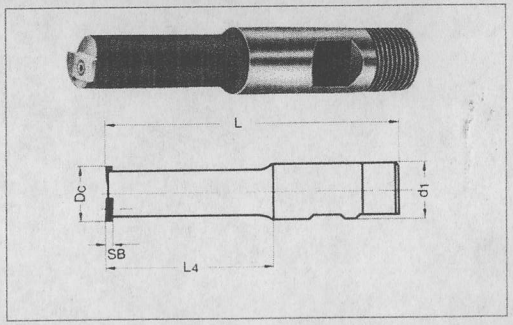


FIGURE 9.53 Fraises à gorge de circlips à une plaquette.
Doc. Walter

9

6. Mise en œuvre du fraisage

6.1 Trajectoires des fraises (mouvements d'avance)

Paraxial

Trajectoires suivant un axe (X ou Y) (fig. 9.54).
C'est la seule possibilité avec fraiseuses à commande mécanique.

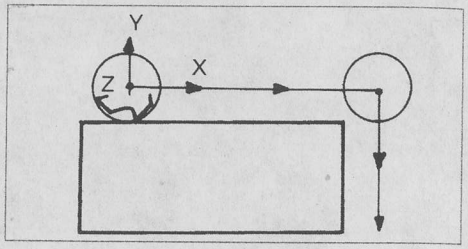


FIGURE 9.54
Fraisage paraxial.

Contournage plan

Trajectoires pouvant être quelconques dans le plan : mouvements simultanés sur les 2 axes X-Y.
Rayon de courbure intérieur minimum d'un profil fraisé en contournage : rayon de la fraise utilisée (fig. 9.55).

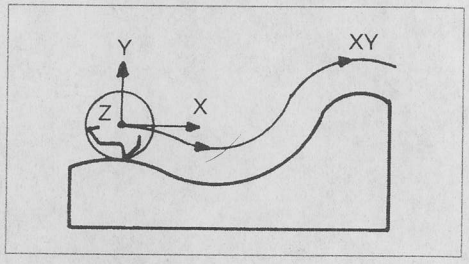


FIGURE 9.55
Fraisage contournage.

Contournage dans l'espace

Trajectoires quelconques dans l'espace dans les limites de l'outil : mouvements simultanés sur les 3 axes X-Y-Z, avec un logiciel de fraisage des surfaces gauches (exemple Numaform de NUM SA) et fraise à bout sphérique.
Rayon de courbure intérieur minimum d'un profil fraisé : rayon d'extrémité de la fraise.

Surfaces gauches

Usinage sur centre d'usinage avec un logiciel de programmation spécifique à ce type de forme

6.2 Mise en position des pièces

À effectuer sans déformer la pièce sous les fixations et en s'opposant aux importants efforts de coupe.
Porte-pièces spécifiques. Nécessaire pour un grand nombre de pièces, avec leur maintien efficace, assurant : les précisions dimensionnelle et géométrique, la répétabilité de production, l'utilisation rationnelle des outils (non-rupture).
Appuis des pièces. Opposés aux efforts de coupe (sens d'avance et position relative de la fraise durant son cycle d'usinage).
Appuis complémentaires allant à la pièce pour assurer, le cas échéant, son maintien efficace (flexion, vibrations...).

Éléments de mise en position et fixation : doivent permettre l'accès des outils d'un maximum de surfaces à usiner (sur plusieurs faces).

Pièces « plates » pouvant se déformer sous les efforts de coupe

À soutenir localement pour s'opposer au fléchissement durant la coupe (fig. 9.56), par : appuis ponctuels sous surfaces brutes ; appuis-plans (règle, grande surface plane) sous surfaces usinées ; appuis complémentaires venant à la pièce.

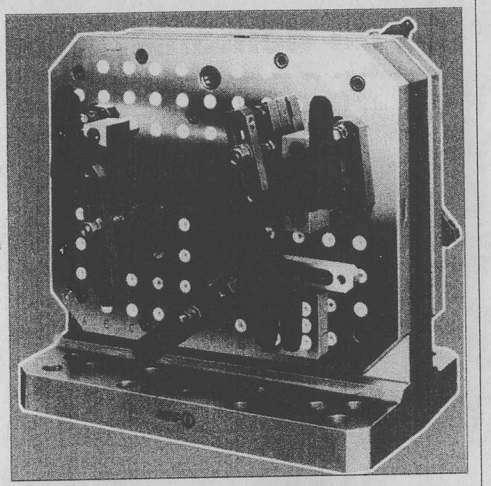


FIGURE 9.56
Pièce déformable installée sur porte-pièce.
Doc. Amf

Pièces plates usinées dans du brut débité de profilé

À maintenir en étau à mors parallèles de précision : outillage flexible élémentaire (fig. 9.57) ; sur porte-pièces spécifiques (série).

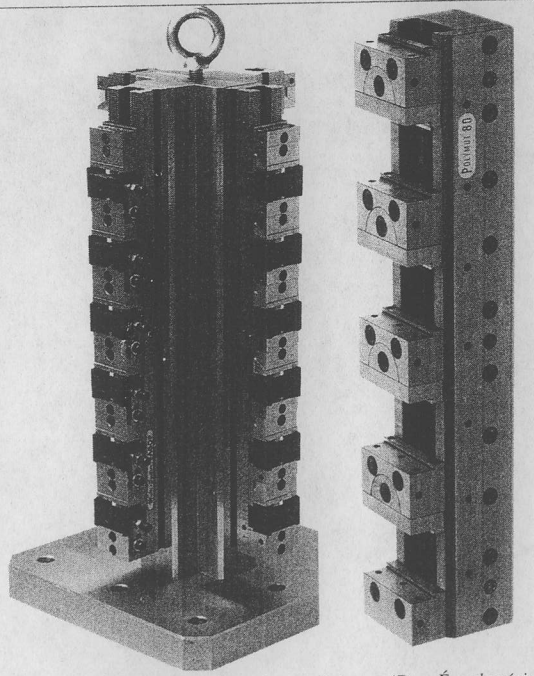


FIGURE 9.57
Étaux multiples pour série.
Multisystem *(Doc. Sagop)* Polymut *(Doc. Évard précision S.A.)*

9

Pièces plates longues

À fixer directement sur la table-machine, par : clames, brides, attraction magnétique, aspiration (grandes pièces non magnétiques) (fig. 9.58).

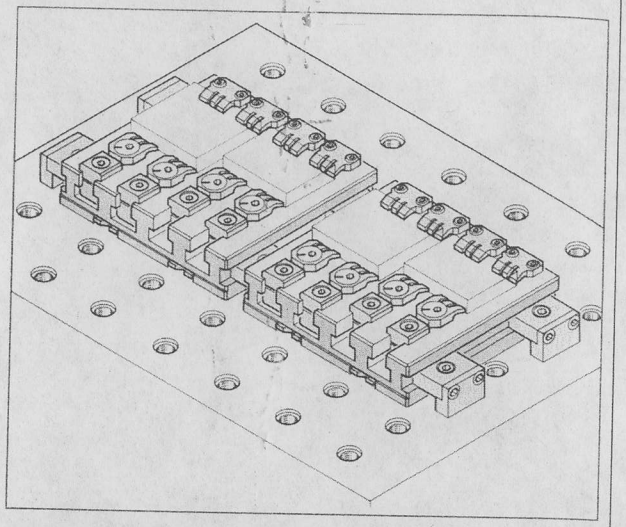


FIGURE 9.58
Schéma de fixation de pièces plates par clames.
Doc. d'Andréa

Pièces plates brutes de forgeage ou moulage

À maintenir dans des portes-pièces spécifiques.
En production unitaire et petites séries : de conception modulaire avec des éléments standards (construction rapide, réutilisation pour pièces suivantes).
Platines ou semelles standards avec trous taraudés et alésés et/ou rainures en T, adaptables à l'ensemble des machines de fraisage d'un atelier, sur table, dé ou équerre, palette.
En production de grande série. Porte-pièces spécifiques avec : un maximum d'éléments modulaires et standards ; serrage, desserrage automatique des pièces ; alimentation et évacuation automatique, éventuellement.

Pièces de petites dimensions

En production de série. À installer en panoplie, dans des chargeurs à fixer sur la machine ; porte-pièces à action unique du bridage multiple (fig. 9.59).

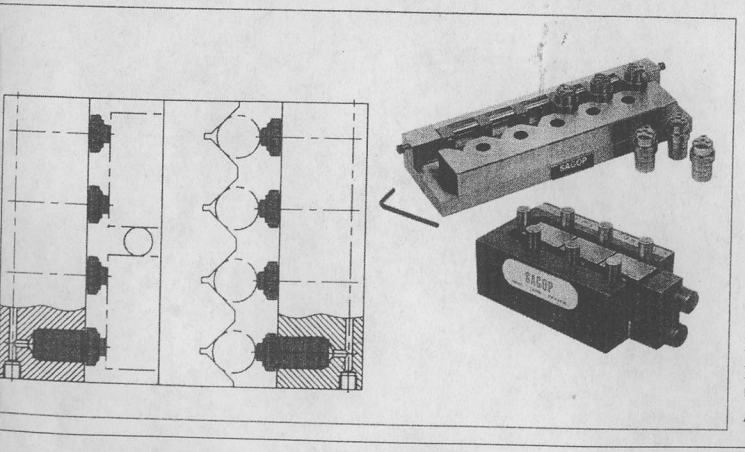


FIGURE 9.59
Fixation de petites pièces par action unique.
Doc. AmF et Sagop

De formes diverses et comportant des usinages suivant plusieurs sens. À maintenir sur plateau-diviseur automatique (piloté par CN) sur fraiseuse ou centre d'usinage à broche verticale de préférence (facilité d'installation des pièces) (fig. 9.60).
Avec mandrin à serrage concentrique de 2, 3 ou 4 mors.
Avec étau de précision, à mors de forme interchangeable.

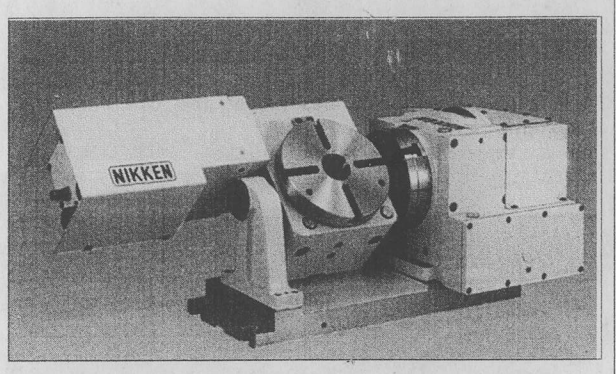


FIGURE 9.60 Plateau circulaire inclinable à CN. *Doc. Nikken*

Pièces « cubiques »

En production unitaire et petites séries. Porte-pièces de conception modulaire standard.
En production de grande série. Porte-pièces spécifiques, avec éléments standards ou non, automatisation du serrage-desserrage des pièces.

Pièces volumineuses

À usiner sur fraiseuse à portique, avec accès des outils à l'ensemble des formes à usiner sur la pièce en appui sur table.

6.3 Conception des outillages porte-pièces

Conçus généralement pour les diverses pièces plates et cubiques, ils devront :
– êtres rigides (efforts de coupe importants, travail aux chocs).
Laisser l'accès à tous les outils à mettre en œuvre pour un maximum de côtés de la pièce, dans une phase (fig. 9.61).
Limiter à 2 phases (en général) l'usinage des pièces, sauf contraintes technologiques.

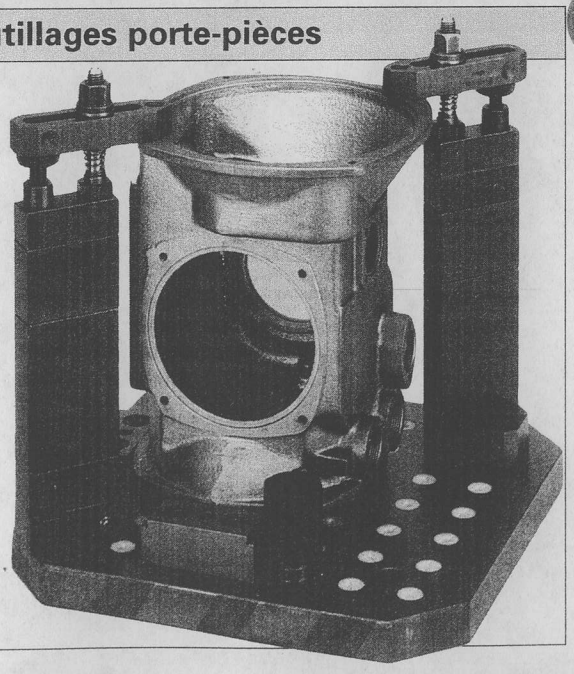


FIGURE 9.61
Porte-pièce de conception modulaire
Doc. Amf

– être de conception modulaire avec éléments standards et semelle maillée de trous et/ou de rainures (fig. 9.62).
Assurer leur mise en place rigoureuse sur table ou palette de machine.

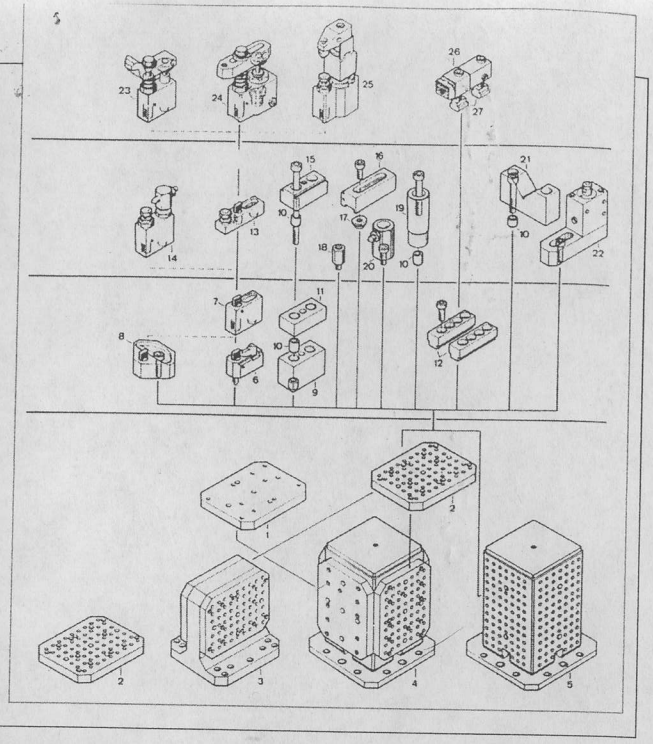


FIGURE 9.62
Éléments modulaires pour conception de porte-pièces.
Doc. Amf

6.4 Opérations d'usinage autres que fraisage (alésage, perçage, filetage)

A effectuer systématiquement en phases de fraisage (sur machines à CN).
Toutes les diverses opérations d'usinage sont à effectuer successivement pour chaque côté de la pièce.

6.5 Menus d'usinage

Disponibles dans les CN pour optimiser production et qualité, et simplifier la mise en œuvre de production (simulation de cycles, sous-programmes).
Les cycles d'usinage génèrent les trajectoires à décrire par l'outil utilisé, avec simulation de la figure (poches de matière avec ou sans îlot, contournage d'un alésage).

6 Machines

On utilise les fraiseuses à broche verticale et à portique, les centres d'usinage à broche verticale ou horizontale. Toutes ces machines sont de type universel: opérations d'usinage par coupe autres que fraisage.

Fraiseuses à CN

Généralement à broche verticale. Avec les 3 axes (X-Y-Z) automatisés: production flexible, de la pièce unitaire à la série, en fraisage paraxial (X ou Y) et en contournage plan (X-Y).
Capacité des machines: volume capable sur la surface de table.
Tête porte-broche indexable en diverses positions, sur certaines machines. Usinage possible d'un maximum de faces dans une phase.

Centres d'usinage à broche horizontale

Avec 4 axes automatisés (X-Y-Z et C, axe circulaire).
Usinage sur toutes les surfaces d'une pièce accessibles dans la phase (pièces cubiques) par indexage de la palette porte-pièce(s).
Capacité des machines - 200 à 800 mm au cube.

Utilisation en production flexible et continue, par l'automatisation :

– Du changement d'outils, avec magasin intégré à la machine: (12 à 100 outils) pour réaliser l'ensemble des diverses opérations sur les pièces dédiées à une machine.
– De l'indexage de palette situant chaque face de pièce(s) à usiner dans la phase: pièce cubique, à l'unité, au milieu de la palette; pièces plates, identiques ou non, fixées en nombre sur un appui vertical (cube, équerre).
– Du changement automatique des palettes (station travail avec station attente).
– De la multiprogrammation pour appel des différents programmes correspondant aux diverses pièces se succédant (production juste à temps).
– De gestion des outils par remplacement automatique d'un outil usagé par l'outil-frère. (Contrôle par mesure du couple à la broche, calcul durée de vie d'arête).

Palettisation

Les palettes, généralement carrées, sont de dimensions standards, déterminant la capacité-machine: cube capable donné par les côtés de la palette (ou le diamètre pour palette cylindrique).
Deux palettes équipent la plupart des centres d'usinage.
Un carrousel de palettes relié au centre d'usinage lui confère une grande autonomie de fonctionnement (cellules flexibles d'usinage).

Centres d'usinage à broche verticale

Avec 4 axes automatisés (X-Y-Z et A ou B, axes circulaires).
Usinage de pièces, petites généralement, successivement sur plusieurs faces sans démontage.
Maintien en l'air ou en mixte (mandrins à mors, plateau circulaire, contre-pointe...).

Cinquième axe

(X-Y-Z, BC ou AC) pour: accéder à des faces de positions diverses; réaliser des surfaces gauches, sans démontage de la pièce (fig. 9.63).
Usinage de pièces d'outillage (moules).

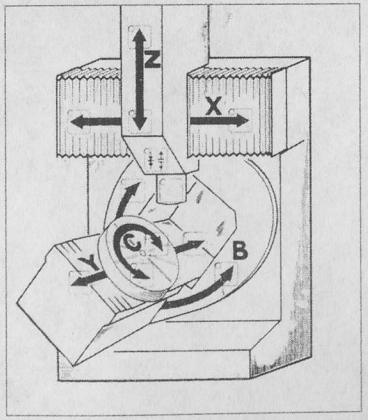


FIGURE 9.63
Schéma de centre d'usinage à broche verticale, 5 axes.
Doc. CMS

6.7 Fraiseuses à portique

De grande capacité, avec table porte-pièce horizontale.
Usinage des pièces volumineuses. Avec plusieurs broches situées verticalement et horizontalement, accès à toutes les faces de la pièce pour son usinage total dans une position.

6.8 Fraiseuses universelles avec règles de mesure des déplacements

À broche verticale pour travaux unitaires en paraxial, avec tête porte-broche orientable.

10 PROCÉDÉS DE MOULAGE

1. Généralités 307
   1.1 Procédés de moulage 308
   1.2 Traitements thermiques des pièces métalliques moulées 310
   1.3 Surépaisseur d'usinage 312
   1.4 Tolérances dimensionnelles de moulage 313
   1.5 État de surface 315
   1.6 Conception des pièces moulées 315
2. Moulage en moule non permanent 318
   2.1 Généralités 318
   2.2 Moulage au trousseau 319
   2.3 Moulage en carcasse ou squelette 319
   2.4 Moulage avec modèle bois 319
   2.5 Moulage avec plaque-modèle métallique 321
   2.6 Moulage en carapace 322
   2.7 Moulage céramique, au plâtre, avec élastomère 323
   2.8 Moulage à la cire perdue 325
   2.9 Moulage avec modèle gazéifiable 325
   2.10 Moulage par centrifugation 326
   2.11 Moulage V process 327
   2.12 Moulage par impact (de Sté Georges Fischer + GF +) 328
   2.13 Inserts métalliques 328
   2.14 Appareillages de moulage non permanent 329
   2.15 Machines à mouler les noyaux 330
   2.16 Machines à mouler 331

3. Moulage en moule permanent 332
3.1 Généralités 332
3.2 Moulage en coquille par gravité 332
3.3 Moulage sous haute pression 337
3.4 Moulage sous basse pression 341
3.5 Moulage en contre-pression 344
3.6 Moulage en centrifugation 345
4. Moulage par compression des poudres et frittage 348
4.1 Généralités 348
4.2 Poudres métalliques 348
4.3 Caractéristiques des pièces 349
4.4 Conception des pièces frittées 350
4.5 Mise en œuvre 351
4.6 Outillage 354
4.7 Machines 356
4.8 Pièces obtenues 356

1. Généralités

Obtention de pièces métalliques et plastiques, de formes, dimensions et poids très divers, par remplissage d'un moule avec le matériau de la pièce à obtenir rendu liquide (alliages métalliques) ou en poudre et granulés (plastiques, métaux et alliages métalliques) (fig. 10.1).

Moules non permanents					
Fontes	**Aciers**	**Alliages d'aluminium**	**Alliages de cuivre**	**Alliages de magnésium**	**Alliages de zinc**
≅ 20 kg à 300 t	≅ 20 kg à 300 t	quelques kg à 3 t	quelques kg à 50 t	quelques kg à 50 kg	≅ 20 kg à 100 kg

Moules permanents					
Fontes	**Aciers**	**Alliages d'aluminium**	**Alliages de cuivre**	**Alliages de magnésium**	**Alliages de zinc**
≅ 100 kg à 10 t	≅ 20 kg à 10 t	quelques grammes à 50 kg	quelques kg à 10 t	≅ 10 kg à 30 kg	≅ 10 kg à 50 kg

FIGURE 10.1
Poids approximatifs des pièces produites en moulage (tous procédés confondus).

La pièce est démoulée après solidification du matériau dans le moule (refroidissement des alliages métalliques, compression des poudres métalliques, solidification des plastiques)
Forme et résistance définitives de la pièce sont obtenues après refroidissement ou frittage, selon les procédés de mise en œuvre.

Choix du procédé

En fonction du matériau et de son état pour le moulage (poudre, granulés, liquéfié) conditionnant la quantité à produire et le type d'outillage à utiliser (moules permanents ou destructibles).

Pièces obtenues

Métalliques (procédés de fonderie)

Pièces d'un gramme à plusieurs centaines de tonnes (jusqu'à trois cents tonnes).
Épaisseurs minimales coulées : selon le procédé et le matériau utilisé, de quelques mm en coulée au sable à quelques dixièmes de mm en coulée en coquille.
Les pièces creuses (carters...), sont facilement réalisables par l'adjonction de noyaux dans l'empreinte du moule.
Production de la pièce unitaire à la série illimitée avec des procédés adaptés à la quantité à produire et à la qualité à obtenir.

Plastiques (procédé de plasturgie)

Pièces de très petites dimensions (et faible poids) coulées en grappe, à de grandes dimensions. Épaisseur de quelques centièmes de mm à quelques mm.
La production est essentiellement de série (généralement « illimitée ») en moules métalliques (automatisés).

1.1 Procédés de moulage

Moulage en moules non permanents

Des alliages métalliques rendus liquides, dans les empreintes de moule, en sable.

Moules en sable

Utilisables pour une pièce : détruits après solidification du matériau.
Moulage de pièces avec tous les métaux et alliages métalliques (fontes, aciers, alliages de cuivre, d'aluminium, de zinc).
La forme de l'empreinte dans le moule est réalisée différemment selon les dimensions de la pièce ainsi que la quantité à produire.

Moulage au trousseau

Production de grandes pièces, en production unitaire par reproduction de la pièce dans le sable à l'aide d'un gabarit : moulage manuel.

Moulage en carcasse ou squelette

Production de grandes pièces (plusieurs mètres), en production unitaire, à partir d'une structure en bois : travaux manuels.
Moulage et conception du modèle (modelage) manuels.

Moulage avec modèle en bois

Production unitaire et de petites séries : moulage manuel ou à la machine.
Dureté du bois de modèle : en fonction de la série à produire (stabilité à l'usage).

Moulage avec plaque-modèle métallique

Production de petite à grande série (fig. 10.2)
Modèles. En bois, résines, métalliques, selon l'importance de la série : à fixer sur plaques métalliques.

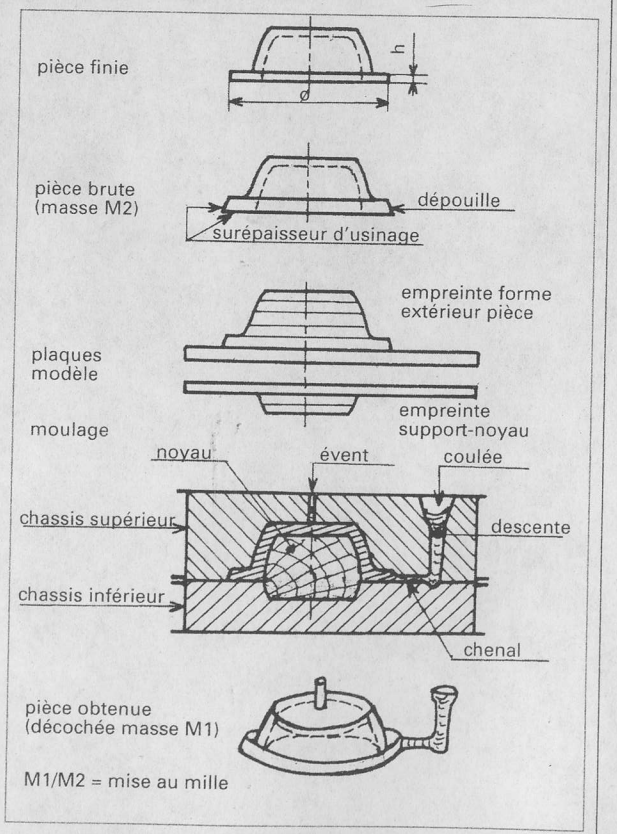


FIGURE 10.2
Schéma du processus de moulage en moule non permanent (avec plaque-modèle).

Moulage en carapace ou procédé Croning

Avec modèle d'épaisseur réduite, en sable et résines thermodurcies : production de pièces précises.

Moulages au plâtre et en céramique

Avec modèle enrobé de plâtre ou de céramique : production de pièces d'excellent état de surface.

Moulage à la cire perdue

Avec modèle perdu (généralement en cire) qui est détruit comme le moule : production de pièces complexes, précises et de petites dimensions.

Moulage à modèle gazéifiable

Modèle généralement en polystyrène, détruit comme le moule : production unitaire.

Moulage par centrifugation

Le moule est animé en rotation durant la coulée : production de type cylindrique.

Moulage V process

Le moule en sable à sec et sans liant est durci sous vide : production de pièces précises (forme, dimensions, état de surface) à partir de petites séries.

Moulage par impact

Le moule en sable est durci par onde de choc : production en série de pièces moyennes d'excellente qualité et avec optimisation.

Le moulage en moules permanents

Des alliages métalliques et des matières plastiques dans des empreintes de moules métalliques.

Moules métalliques

Utilisables jusqu'à leur usure totale, dans les limites de précision des pièces à produire.
La forme de l'empreinte est usinée dans des blocs métalliques constituant le moule (mécanisé ou automatisé selon l'importance des séries) (fig. 10.3).
Production de pièces aux caractéristiques mécaniques supérieures au moulage en sable : la dureté Brinell augmente de 5 à 8 % et la charge à la rupture de 10 à 12 %.
Le moulage s'effectue suivant plusieurs méthodes, optimisant qualité (dimensionnelle, forme, métallurgique) avec productivité.

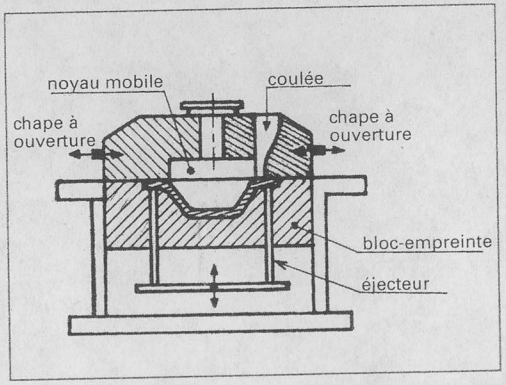


FIGURE 10.3 Schéma de principe du moulage permanent (par gravité en petite série).

Moulage en coquille, par gravité

Le métal en fusion remplit l'empreinte du moule par la pesanteur : production en série.

Moulage sous haute pression

Injection sous haute pression de l'alliage en fusion dans l'empreinte : production de grande série avec des outillages entièrement automatisés.

Moulage en basse pression

Injection sous une basse pression de l'alliage en fusion dans l'empreinte : production automatisée de pièces, particulièrement en alliages d'aluminium et de cuivre.

Moulage en contre-pression

Injection de l'alliage en fusion dans l'empreinte, sous basse pression avec une contre-pression dans l'empreinte : production automatisée de pièces diverses de haute qualité, en tous matériaux coulables.

Moulage par centrifugation

Injection de l'alliage en fusion dans l'empreinte sous une forte accélération de l'alliage (à forte masse volumique) : production de pièces cylindriques en particulier, en mono, bi ou multimétaux.

Moulage par frittage

Nécessite, préalablement au frittage de la pièce, le moulage de cette pièce par compression d'une poudre métallique, dans un moule permanent : production de pièces spécifiques (poreuses) en grande série, avec précision (produit fini ou semi-ouvré).

1.2 Traitements thermiques des pièces métalliques moulées

Différents traitements thermiques peuvent être effectués sur les pièces obtenues par moulage. Le traitement thermique approprié, total ou partiel, est fonction du matériau constitutif de la pièce et de son utilisation.

Modifications recherchées sur les pièces coulées

Structurales (forme et dimensions, répartition des constituants sans en modifier la nature) ; teneur d'élément d'un alliage ; nature de certains constituants ;
dureté superficielle ; contraintes (sans modifier la nature des constituants).

Traitements thermiques appliqués

Pour un état de livraison des pièces coulées, selon les matériaux constitutifs :
stabilisation, normalisation, recuit, durcissement, malléabilisation, trempe et revenu.

Stabilisation

Modification en intensité et en répartition. Les contraintes internes de la pièce, sans modifier la nature des constituants : obtention stabilité géométrique et structurale.
Les contraintes résiduelles dues à l'anisothermie durant la solidification et le refroidissement de la pièce, qui tendent à la modifier géométriquement, sont réduites par ce traitement thermique, avec obtention d'un état physico-chimique stable du matériau.

Traitement (aciers, fontes)

Chauffe de la pièce jusqu'à 300 °C minimum (température de fluage des zones sous contraintes, sans modification de la nature des constituants).
Maintien en température durant un temps déterminé (selon le matériau, le volume et la forme de la pièce).
Refroidissement à une vitesse donnée jusqu'à une température définie.

Matériaux stabilisés

Aciers, fontes grises, alliages d'aluminium et de magnésium.
Aciers. Pièces soumises à de fortes sollicitations (engrenages...) ou à des chocs thermiques (moteurs à explosion, outillages...).
Fontes. Grises, martensitiques, bainitiques : pièces volumineuses et devant avoir une grande stabilité à l'usage (éléments de machines...).

Alliages d'aluminium

Ne devant pas subir un traitement thermique de durcissement pour pièces devant être usinées (enlèvement de matière libérant les contraintes résiduelles de moulage, pièces devant être utilisées dans des conditions sévères (pistons de moteurs à explosions...).
Traitement. Chauffe de la pièce entre 150 et 350 °C durant quelques heures (2 à 10 heures, selon les dimensions de la pièce ; refroidissement lent (dans le four de chauffe).

Certains alliages de magnésium

Pièces devant être usinées :
Traitement. Chauffe de la pièce à 200 °C durant 15 à 20 heures ; refroidissement lent (dans le four de chauffe).

Normalisation

Homogénéisation des structures perlitiques des aciers et des fontes : obtention d'une structure bien définie.

Matériaux stabilisés

Aciers au carbone ou faiblement alliés. Pièces devant avoir une structure perlitique fine.
Aciers à faible teneur en carbone. Pièces devant avoir une structure bainitique ou martensitique.
Fontes. Pièces devant avoir une réduction de la ferrite libre.
Traitement : chauffe de la pièce entre 800 et 930 °C, puis trempe à l'air.

Recuit

Diminution de la dureté pour abaisser la quantité de carbures libres ou de perlite des pièces coulées, en fonte et en acier : affine et uniformise le grain du matériau.

Matériaux recuits : fontes, aciers

Le carbone est précipité à l'état de graphite.
Traitement. Chauffe de la pièce entre 900 °C et 1 050 °C durant 1 à 3 heures ; refroidissement lent (dans le four de chauffe ou à l'air).
Recuit de détente. Traitement de stabilisation : chauffe de la pièce entre 600 °C et 750 °C durant 1 à 2 heures ; refroidissement lent (dans le four de chauffe).

Durcissement

Augmentation de la dureté, de la charge à la rupture, et en particulier de la limite élastique avec équilibre de la solution solide.

Matériaux durcis : aluminium et ses alliages

Traitement. Homogénéisation, trempe et durcissement du matériau : chauffe de la pièce entre 450 °C et 600 °C, durant plusieurs heures (6 à 15 heures, selon les pièces) ; trempe par refroidissement rapide (à l'eau) produisant une solution solide homogène, mais instable ; revenu, par maintien de la pièce à environ 200 °C durant plusieurs heures (5 à 15 heures, selon les pièces) : durcissement structurel avec équilibre de la solution solide.

Durcissement par maturation. Après trempe, faire séjourner la pièce quelques jours (4 à 5) à température ambiante (≅ 20°) : vieillissement naturel.

Malléabilisation

Obtention de structures bien définies. Répondre à une utilisation, faciliter un usinage ultérieur.

Matériaux malléabilisés - fontes

Selon le traitement appliqué, la fonte malléabilisée sera à « cœur blanc » dite Européenne, à graphite nodulaire ferritique (à « cœur noir », dite Américaine) ou à graphite nodulaire perlitique.

Fonte à cœur blanc

Obtenue en décarburant le matériau, par chauffe de la pièce à 1 000 °C, en atmosphère contrôlée d'oxyde de carbone, durant 50 à 100 heures (selon la pièce) ; refroidissement très lent (≅ 10 °C par heure) jusqu'à 650 °C et refroidissement final plus rapide (≅ 30 °C par heure).

Fonte à cœur noir

Obtenue en graphitisant le matériau (le carbone précipite à l'état de graphite) par chauffe de 800 à 900 °C durant 10 à 20 heures ; refroidissement très lent (≅ 3 °C par heure) jusqu'à 650 °C et refroidissement final rapide.

Fonte à graphite nodulaire perlitique

Obtenue par une double trempe et un revenu de la pièce : chauffe à 1 000 °C durant 10 à 15 heures et trempe à l'air ; chauffe à 800 °C durant quelques heures (3 à 4) et trempe à l'huile ; revenu à 650 °C.

Pièces moulées en aluminium et ses alliages

Peuvent être livrées avec des traitements thermiques spécifiés, tels que recuit, stabilisation, trempe et revenu, trempe et maturation, trempe et stabilisation.
La normalisation (NF A 02-002) codifie ces états de livraison (0 à 9) ainsi que le mode d'obtention en moulage (Y0 à Y9).

1.3 Surépaisseur d'usinage

Surépaisseur de matière sur les surfaces fonctionnelles à usiner (coupe, abrasion).
À prévoir sur les dessins de définition du produit brut (ordre d'exécution donné au fondeur).
Elles varient selon : dimensions et forme des pièces ; classe des tolérances dimensionnelles ; procédé de moulage.
Normalisées pour la fonte grise non alliée et les aciers coulés en sable (fig. 10.4).

Surfaces brutes de départ de cotation du produit fini

Sauf convention demandeur/fondeur, réduire la surépaisseur d'usinage à 2 mm pour pièces de plus grande dimension ≤ 250 mm ; 3 mm au-delà.

Surépaisseurs non normalisées

Elles varient selon le procédé de moulage et les dimensions de la pièce. On admet :
– Fontes alliées et spéciales : identique à fonte grise ; alliages d'aluminium : 0,8 mm minimum ; alliages de cuivre : 1,2 mm minimum ; alliages de zinc : 0,2 à 0,5 mm.

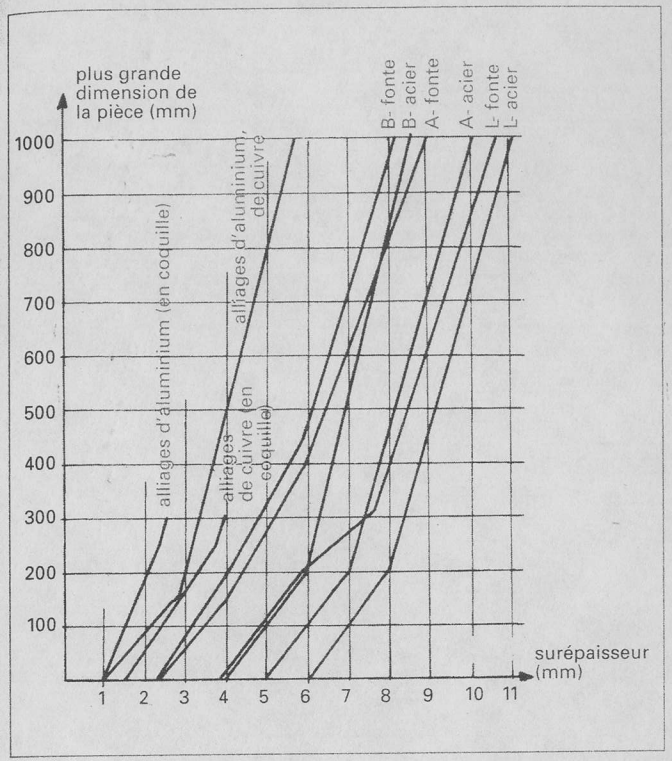


FIGURE 10.4
Ordre de grandeur des surépaisseurs d'usinage en moulage au sable (classes de tolérances A, B, L).

Nota : Simplification d'un modèle en production de petite série : augmenter la surépaisseur d'une surface (obtention d'un joint plan...).

1.4 Tolérances dimensionnelles de moulage

Elles sont définies par des classes de précision du produit fini (produit brut).
Normalisées pour fonte grise non alliée et aciers : classes L, A, B, P.
La référence de précision est donnée par la plus grande dimension D de la pièce.

Classes de tolérances

Classe de tolérances L

Pour les cotes du produit fini non tolérancées.

Classe de tolérances A

Pour les cotes tolérancées du produit fini, le moulage de la pièce est effectué avec modèle bois.

Classe de tolérances B

Pour les cotes tolérancées du produit fini, avec moulage de la pièce effectué en modèle métallique.

Classe de tolérances P

Associée aux classes L, A, B, pour les cotes de forme de la pièce qui ne seront pas usinées et répondent à une fonction conceptuelle (parois, nervures, bossages...) (fig. 10.6).
Cette tolérance peut être choisie unilimite (un écart nul) pour les aciers.

Dispersion de cote

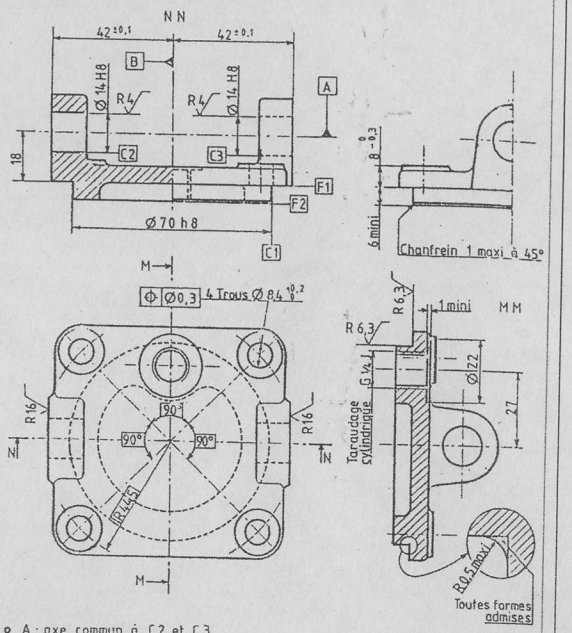
À considérer pour les pièces à faible surépaisseur d'usinage obtenues en moulage au sable avec assemblage de deux châssis. On admet ≅ 1 mm ± 0,5.

Intervalle de tolérances dimensionnelles de moulage

À ajouter à la surépaisseur d'usinage des surfaces fonctionnelles. Selon les procédés de moulage, d'après la plus grande dimension D des pièces.

- aciers coulés ; fontes grises, alliées et spéciales : IT (moulage au sable) ± (0,5 + 0,002 D) en millimètres.
- alliages d'aluminium : ± 0,3 à ± 0,8 (en moules métalliques) et js11 à js12 (sous pression).
- alliages de cuivre : ± 0,5 à ± 1 (en moules métalliques) et js13 (sous pression).
- alliages de zinc : ± 0,1 à ± 0,2 (en moules métalliques) et js10 (sous pression).

Définition du produit fini



- o A : axe commun à C2 et C3.
- o B : axe ⊥ à F1 passant par le centre de C1 dans F1.
- • Matière : A-S5 U.
- • Ébauche moulée au sable.
- o R 25 sauf indication.

C2	◎	Ø 0,02	A
C3	◎	Ø 0,02	A
F1	//	0,05	A
F2	//	0,05	F1

14 H8 = $14^{+0,027}_{0}$
70 h8 = $70^{-0}_{-0,046}$

Définition du produit brut (non coté)

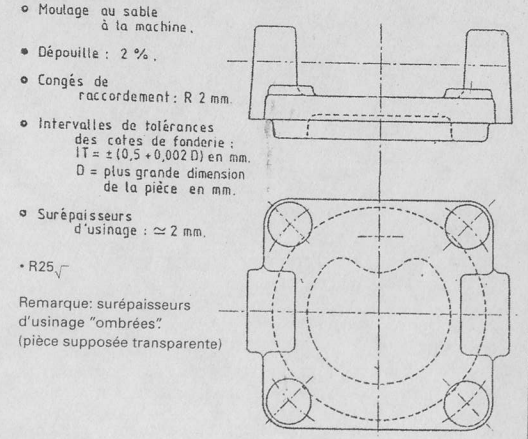


FIGURE 10.5
Définitions d'une pièce mécanique. (support d'épreuve d'examen).

1.5 État de surface

Selon le procédé d'obtention des pièces.
Moulage au sable 12,5 à 6,3 Ra ; moulage métallique 6,3 à 3,2 Ra ; moulage sous pression 3,2 à 1,6 Ra ; moulage cire perdue 1,6 à 0,8 Ra.

1.6 Conception des pièces moulées

Règles technologiques de conception du produit moulé « brut capable » de contenir le produit fini (fig. 10.5).

Aptitude à l'usinage

Prévoir des formes facilitant l'usinage de la pièce :
Mise en position efficace (appuis et fixation) et non-déformabilité sous les efforts de bridage.
Permettre l'accès des outils à un maximum de surfaces dans une phase (sur centres d'usinage et de tournage) (fig. 10.6).

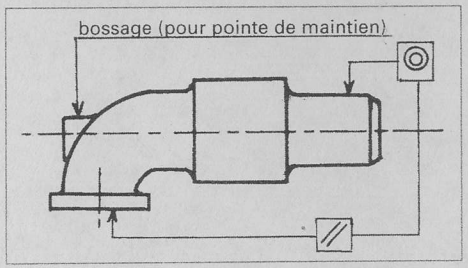


FIGURE 10.6 Bossage sur pièce facilitant la mise en position d'usinage.

Parois de pièces

Concevoir l'épaisseur minimale et suffisante pour assurer le remplissage effectif de l'empreinte, en fonction de : alliage de coulée, dimensions de pièce, procédé de moulage.

Épaisseur des parois

Augmente avec les dimensions de la pièce et doit être relativement constante (fig. 10.7).
Nécessaires variations d'épaisseur progressives : évite criques et retassures (retard de solidification dû à une rapide variation d'épaisseur).
Rapport de variation admis : 1,5 maxi avec pente de raccordement à 10 % (fig. 10.8).
Raccordement des parois par congés : facilite le remplissage de l'empreinte.

Alliages	Moulage		
	Au sable	Métallique	
		Par gravité	Sous pression
Aciers	6 mm		
Fontes	5 mm		
Alliage d'aluminium	4 mm	3 mm	1 mm
Alliage de cuivre	5 mm	2,5 mm	1,5 mm
Alliage de zinc		2 mm	0,5 mm

FIGURE 10.7 Épaisseurs minimales des parois.

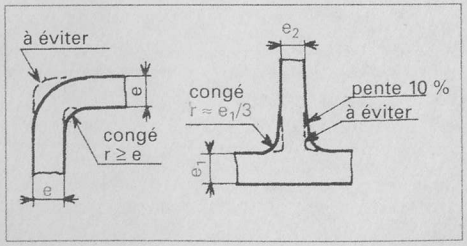


FIGURE 10.8
Raccordements de parois.

Forme des parois

Parois inclinées (sur la verticale) : donne une dépouille naturelle ; toiles inclinées (sur l'horizontale) : favorise l'évacuation des gaz à la coulée (fig. 10.9).
Éviter les parois verticales et les toiles horizontales.

Nœuds de nervures

À simplifier pour éviter les points chauds qui retardent la solidification (fig. 10.10).

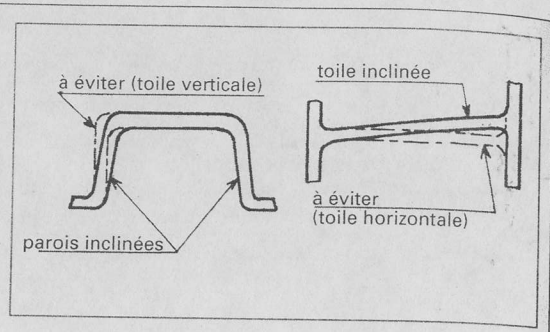


FIGURE 10.9 Paroi et toile inclinées.

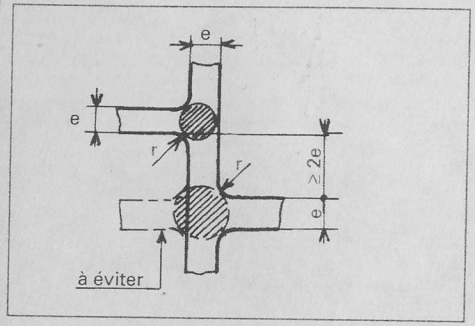


FIGURE 10.10 Nœud de nervures.

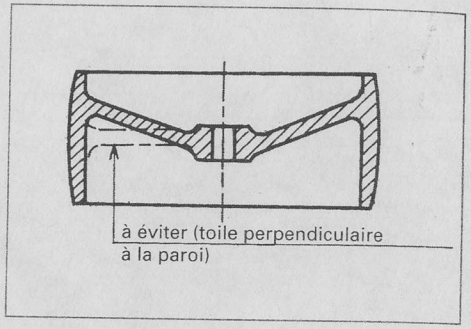


FIGURE 10.11 Toile de raccordement.

Bras et toiles de raccordement

À concevoir non rectilignes et non perpendiculaires à la paroi pour assurer la déformation élastique durant la solidification : le retrait au refroidissement provoque des contraintes internes à la jonction des parois (fig. 10.11 et 10.12).

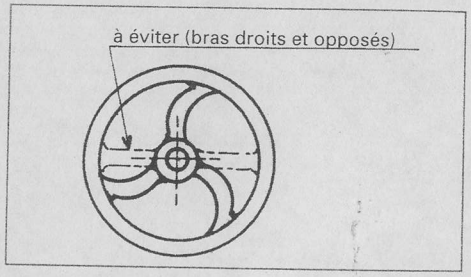


FIGURE 10.12
Bras de raccordement.

Dépouilles

Assurent l'extraction du modèle de son empreinte, avant moulage de la pièce. Elles varient selon le procédé utilisé, la forme et les dimensions de pièce.
On considère : cas général, dit dépouille normale : 2 % ; formes fragiles : 5 % ; évidements et nervures peu hautes : 10 % ; grandes surfaces : 1 % ; pièces coulées en moule permanent : 0,5 %.

Pièces creuses

Nécessairement noyautées, elles auront de préférence des ouvertures opposées : assure un maintien stable du noyau (fig. 10.13).

Noyaux

N'ont pas de dépouille en intérieur de pièce.
Éviter d'en placer en extérieur de pièce.

Plan de joint de moulage

Permet le démoulage du modèle. Contient la plus grande section ou le plan de symétrie de la pièce, limite le nombre de noyaux et favorise leur stabilité dans le moule (fig. 10.14).

Sollicitations des pièces finies

Formes des pièces moulées, à concevoir en recherchant l'équilibre des sollicitations à subir par la pièce finie.
Caractéristiques mécaniques à considérer : résistance à la compression supérieure à la résistance à la traction ; résistance à la flexion assurée par des formes nervurées ; résistance à la torsion assurée par des formes en caisson.

Trous venant du moulage

Dans les limites de conception permises :
Trous de grand diamètre : viennent du moulage, à renforcer par un bossage (fig. 10.15).
Moulage au sable : trous inférieurs à 15 mm, ne viennent pas du moulage.

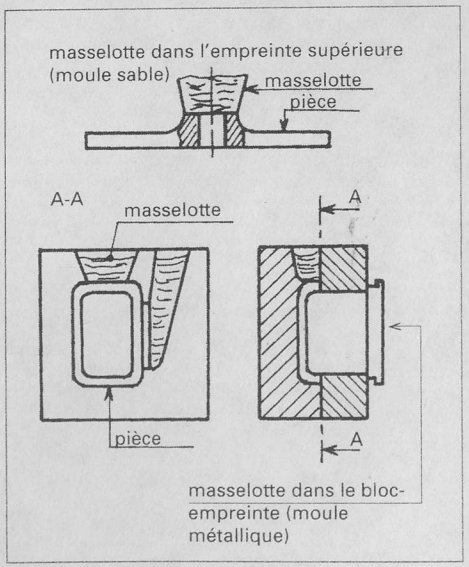


FIGURE 10.15 Masselottage de pièces.

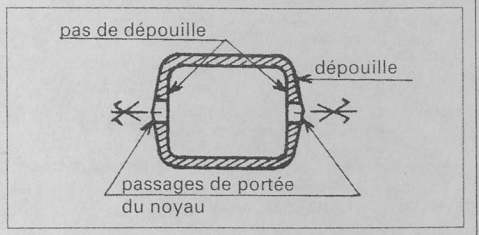


FIGURE 10.13
Pièce creuse avec ouvertures pour noyautage.

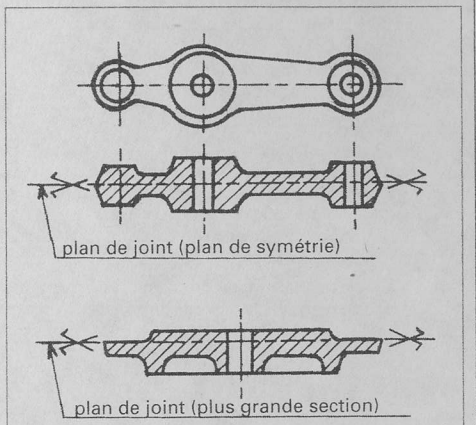


FIGURE 10.14 Plans de joint de moulage.

Masselottage

Réserve de métal qui déporte la retassure hors pièce. Maintient le métal à l'état liquide le plus longtemps possible.
La retassure est le défaut principal du moulage, causé par la contraction (le retrait) de l'alliage durant sa solidification.
Cet excédent d'alliage est à faire venir en partie supérieure de la pièce (ou se situe la retassure) (fig. 10.15).
La masselotte doit être de forme massive et reliée au maximum à une partie massive de la pièce, son action étant de courte durée.

2. Moulage en moule non permanent

2.1 Généralités

Outillage

À concevoir avant la coulée de l'alliage : modèle en boîte à noyau (fig. 10.16).

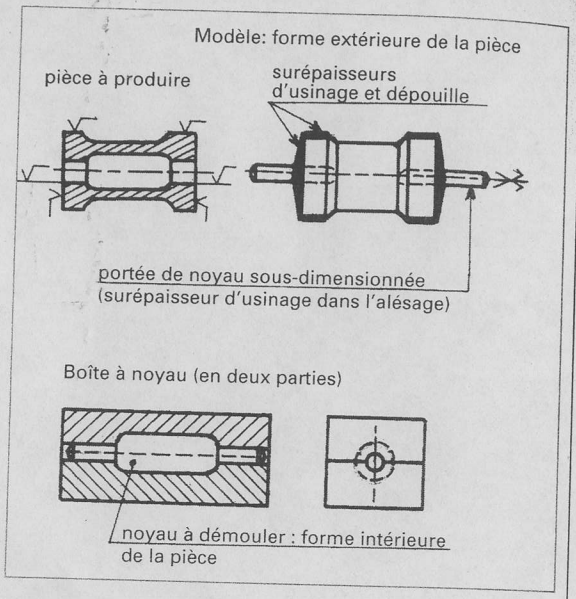


FIGURE 10.16
Outillage à concevoir en moulage à modèle bois.

Modèle

Il définit la forme extérieure des pièces avec les surépaisseurs d'usinage et les dépouilles pour son démoulage.

Boîtes à noyau

Moulage des noyaux définissant les formes creuses des pièces, intérieurement et extérieurement.

Réalisation des empreintes

Tassement du sable de fonderie autour du modèle, dans un châssis (inférieur ou supérieur).
Extraction du modèle de son empreinte et fermeture du moule (empilage des deux châssis, supérieur et inférieur).

Nota : Modèles perdus, thermofusibles (en cire, polystyrène) subsistent dans le moule et sont éliminés durant la coulée de l'alliage.

Sables utilisés

Silico-argileux naturel ou synthétique : « à vert », à prise par tassement, étuvage ou chauffage.
Siliceux. À prise en boîte froide ou chaude, avec un catalyseur, des résines.

Prise du sable

Durcissement sur le modèle). Effectuer à froid ou à chaud, avant extraction du modèle, selon le procédé de moulage mis en œuvre.

2.2 Moulage au trousseau

Moulage en moule non permanent, sans outillage (ni modèle, ni boîte à noyaux) avec prise à froid du sable.
Un gabarit, le trousseau, permet de réaliser l'empreinte dans le sable de moulage (sable étuvé, en principe (fig. 10.17). Les éventuels noyaux sont réalisés de la même façon.

Utilisation

Production unitaire de grandes pièces à section constante :
- Pièces longues : l'empreinte est obtenue par translation du gabarit.
- Pièces cylindriques courtes : l'empreinte est obtenue par rotation du gabarit autour d'un pivot.

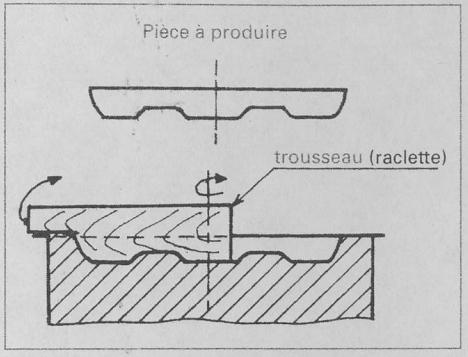


FIGURE 10.17 Moulage au trousseau (pièce cylindrique courte).

2.3 Moulage en carcasse ou squelette

Moulage en moule non permanent, à partir d'une structure en bois matérialisant les principaux profils de la pièce.
La structure – carcasse ou squelette – est remplie de sable, afin de modeler le modèle, complétant les formes de la structure (fig. 10.18).

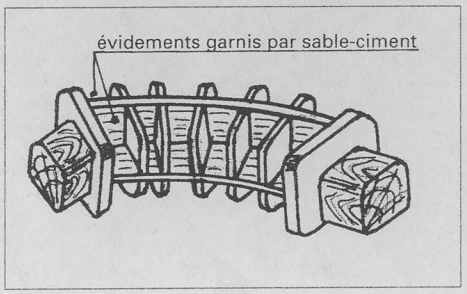


FIGURE 10.18
Modèle carcasse ou squelette (grosse pièce tubulaire).

Sable de moulage

Associé à du ciment, constitue un moule rigide (prise à froid, en quelques jours).

Utilisation

Production unitaire de très grandes pièces au profil non régulier (surface enveloppe de plusieurs mètres carrés).

2.4 Moulage avec modèle bois

Moulage en moule non permanent, avec un modèle réutilisable (en bois) donnant son empreinte dans le sable de moulage.
Noyaux éventuels. En sable de moulage, réalisés dans des boîtes à noyaux réutilisables (en bois) par moulage mécanique en général.

Modèle (au naturel)

Correspond à la forme enveloppe extérieure de la pièce brute, plus les éventuelles portées de noyau.
Construit en une ou deux parties, selon les pièces à obtenir, devant être démoulable de son empreinte dans le sable (fig. 10.19).

Modèle en une partie.
S'extrait de son empreinte après moulage dans le sable du châssis supérieur.

Modèle en deux parties.
Séparées à la surface du plan de joint ; chaque châssis reçoit une empreinte (une partie de la pièce).

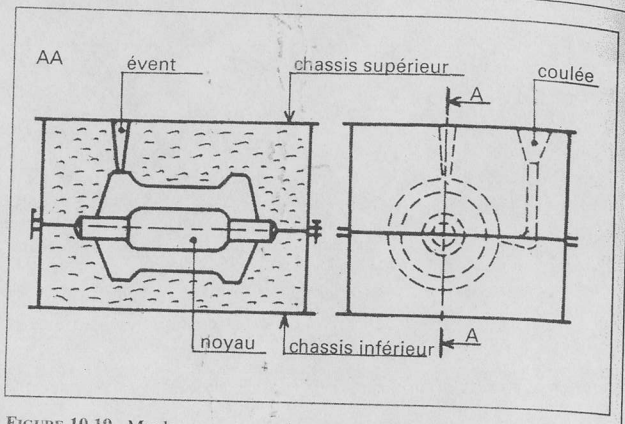


FIGURE 10.19 Moulage avec empreinte par modèle bois.

Sable utilisé

À vert ou étuvé, durci à froid. Pour les noyaux, durci de préférence à chaud.

Systèmes de remplissage et d'alimentation

Réalisés manuellement dans le sable de moulage.

Utilisation

Production unitaire à la petite série (≅ 20 pièces maxi).
Modèle, non réutilisable, conçu en bois tendre (bois dur aux parties fragiles).
Petites séries répétitives. Modèle en bois mi-dur et dur : utilisation pour 100 pièces maxi : systèmes de remplissage et d'alimentation éventuellement en bois.

Noyautage

Le noyau comble un volume qui constitue une forme non remplie par l'alliage à la coulée. Il est maintenu en position dans l'empreinte par les portées situées dans le sable (au moulage préalable du modèle).

Noyau intérieur de l'empreinte.
Produit une forme en creux (après élimination) dans la pièce solidifiée (fig. 10.19 et 10.20).

Noyau extérieur à l'empreinte.
Obtention de formes qui ne seraient pas moulables avec le modèle, en faisant fonction de chape (fig. 10.21).

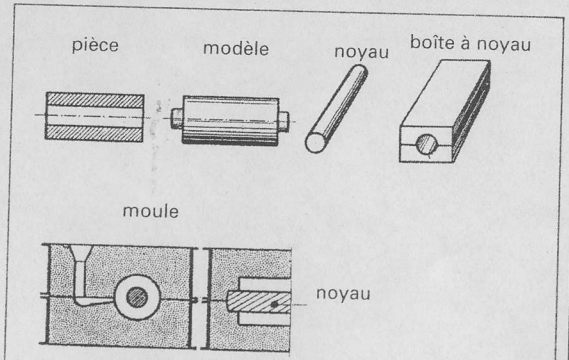


FIGURE 10.20 Moulage avec noyau intérieur à la pièce.
(Doc. Éditions techniques des industries de la fonderie).

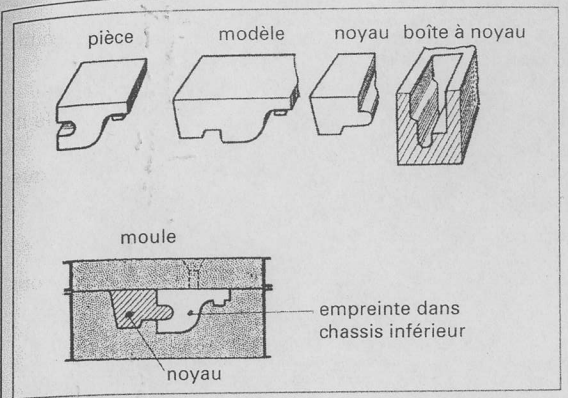


FIGURE 10.21
Moulage avec noyau extérieur à la pièce.
(Doc. Éditions techniques des industries de la fonderie).

2.5 Moulage avec plaque-modèle métallique

Moulage en moule non permanent, à partir d'un mode réutilisable (en bois) conçu en une forme ou deux formes.
Chaque forme, généralement, est fixée sur une plaque métallique, ainsi que les systèmes de remplissage et d'alimentation (fig. 10.22).

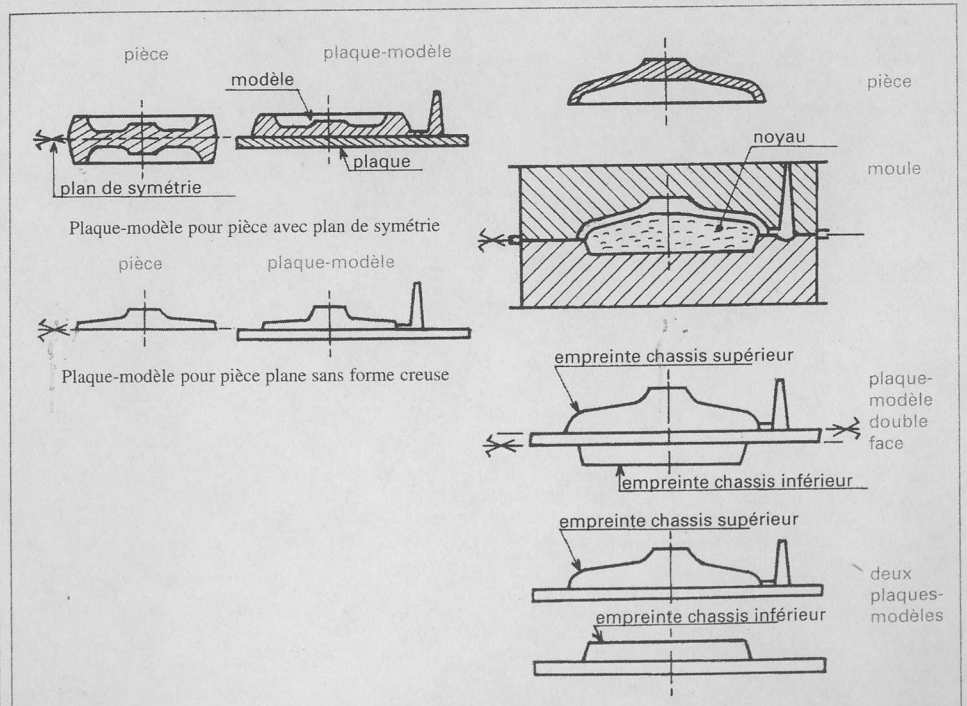


FIGURE 10.22 Plaques-modèles (pour moulage mécanique).

Chaque châssis du moule reçoit l'empreinte d'une forme, avec une seule surface de joint, plane.
Selon les pièces à produire, les plaques-modèles sont :
Pièces avec une face plane, sans forme creuse : une plaque-modèle pour l'empreinte de la pièce dans un châssis.
Pièces avec une forme creuse : une plaque-modèle « double-face » (une empreinte de chaque côté de la plaque) ou deux plaques-modèles.

Plaques porte-modèle

Généralement en acier, dimensionnées pour les châssis. Comportant un réseau de trous pour fixer différents modèles.

Matériaux des modèles

Selon l'importance de la série et la complexité des formes de la pièce : bois dur vernis ou surmoulé de résines synthétiques ; plastique renforcé en acier aux zones fragiles ; alliage d'aluminium ; résines stratifiées ; acier.

Utilisation

Production de petite à grande série, de pièces de bonne précision en moulage mécanique.

Modèle en bois demi-dur et dur

Production totale ≅ 150 pièces maxi. Avec modèle dédoublé par surmoulage, production de plusieurs centaines de pièces (moins précises).

Modèle en bois dur vernis et/ou bois amélioré avec zones fragiles en métal ou en plastique renforcé

Conception évitant toute déformation due à l'hygrométrie ambiante (démoulage aisé).
Production totale ≅ 250 pièces maxi.
Boîtes à noyaux : Même construction que les modèles, pour noyautage mécanique ou soufflage.
Tirages d'air obtenus par broches métalliques.

Modèle métallique, ou bois amélioré et résine ou plastique renforcé

Production jusqu'à 10 000 pièces.
Boîtes à noyaux conçues pour utilisation sur machine à noyauter.

Production de grande série (au-delà de 10 000 pièces)

Modèle modulaire permettant le remplacement d'éléments usés. Conception entièrement métallique (acier, fonte…) avec des dispositifs de productivité.

2.6 Moulage en carapace

Procédé de moulage – procédé Croning – en moule non permanent à partir d'un modèle métallique, en deux demi-formes, recouvert d'une carapace de sable et de résines (fig. 10.23).

Carapace

Aggloméré de sable siliceux et de résines thermodurcissables, d'épaisseur 3 à 12 mm. Forme une croûte par polymérisation au contact du modèle métallique chauffé (250 à 300 °C).

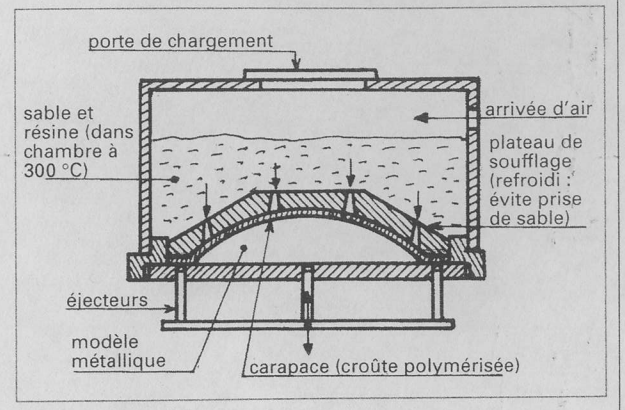


FIGURE 10.23
Schéma de principe du moulage en carapace (soufflage par le haut).

Sable

Préenrobé de résines, amené au modèle par soufflage ou par renversement. De faible granulométrie : obtention d'un bon état de surface des pièces.

Modèle

Plaque-modèle métallique, avec système d'éjection de la carapace. Conçue pour une production de 10 000 pièces à la série illimitée (jusqu'à usure de l'outillage).

Noyaux

Obtenus en carapace (pouvant être évidés) à l'aide de machines spécifiques à souffler le sable par le bas (noyaux d'un kilogramme maxi) ou par le haut (noyaux importants).
Machine à soufflage du sable par le bas : noyau formé dans une boîte à noyau métallique ouvrante, formant la carapace enveloppe (fig. 10.24).

Utilisation

Production de petite à grande série, de pièces aux dimensions moyennes à très petites qui nécessitent précisions dimensionnelle et d'état de surface.

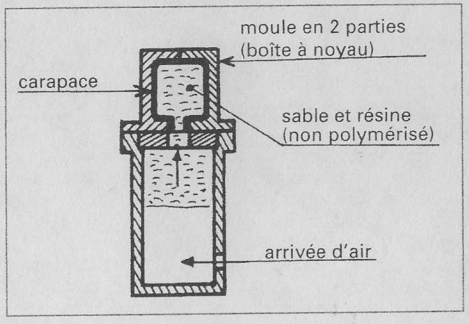


FIGURE 10.24 Schéma de principe du moulage en carapace d'un noyau (soufflage par le bas).

2.7 Moulage céramique, au plâtre, avec élastomère

Moulage céramique

Moulage en moule non permanent de précision, à partir d'un modèle en bois qui donne son empreinte dans une couche intermédiaire au sable du moule (fig. 10.25).
Couche intermédiaire : produits réfractaires liés au silicate d'éthyle, d'une épaisseur de 10 à 15 mm, obtenue par une forme limitant l'épaisseur.

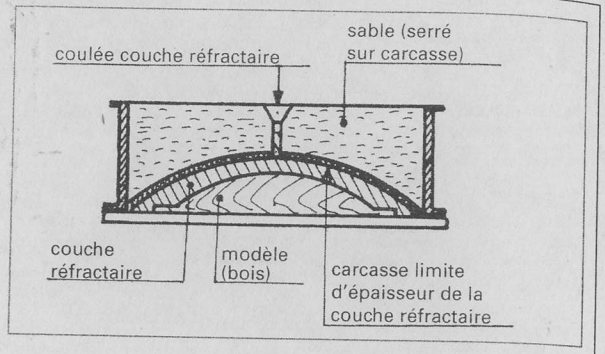


FIGURE 10.25
Schéma du moulage céramique.

Moule céramique

Conserve durant quelques minutes une consistance élastique permettant le démoulage du modèle (d'une très faible dépouille) ; frittage de la céramique (chauffe ≅ 900 °C).

Pièces obtenues

De bonne qualité : la finesse du grain des produits réfractaires donne un excellent état de surface ; faible dilatation du moule à la coulée (le chauffage donne de la perméabilité) : assure une très bonne précision dimensionnelle.

Utilisation

Moulage manuel en production unitaire à petite série : pièces de moyennes à grandes dimensions, avec de bonnes précisions (dimensionnelle, état de surface, pas ou très peu de dépouille).

Moulage au plâtre

Analogue au moulage céramique. Moule non permanent avec une couche intermédiaire entre le modèle et le sable.
Couche intermédiaire : mélange de plâtre, de silice, de talc et d'un adjuvant (ciment...).
Moule. Utilisé après séchage en étuve.

Pièces obtenues

De précision en forme et état de surface, par la finesse du plâtre.

Utilisation

Moulage manuel, en production unitaire à la petite série, de pièces de petites et moyennes dimensions aux formes complexes, avec un bon état de surface.

Moulage avec élastomère

Analogue au moulage céramique. Moule non permanent avec une couche intermédiaire entre le modèle et le sable.
Couche intermédiaire. En élastomère (qui résiste jusqu'à la température de 250 °C) : assure une excellente précision de l'empreinte.

Utilisation

Moulage de formes complexes.

2.8 Moulage à la cire perdue

Moulage en moule et modèle non permanent, à partir d'un modèle en cire comprenant la forme de la pièce sans dépouille avec les systèmes de remplissage et d'alimentation.

Modèle

Il est produit par moulage dans un moule maître, en production de série ; une grappe de modèles-pièces peut être constituée pour optimiser la coulée (cas des petites pièces) (fig. 10.26).
Après réalisation, il est recouvert d'une couche de 3 à 12 mm des produits réfractaires liés au silicate d'éthyle, par trempage ou projection formant une carapace. Installé dans le moule (en sable) généralement en une partie (modèle et systèmes de remplissage-alimentation) il est éliminé par fusion (chauffage du moule).

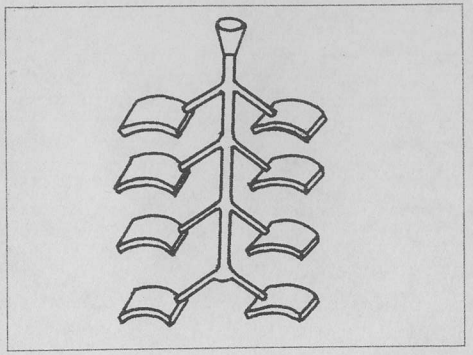


FIGURE 10.26 Grappe de modèles (en cire) pour moulage à la cire perdue.

Moule

Il est fritté (à 900 °C) et utilisé à chaud, améliorant la coulabilité de l'alliage avec limitation de chocs thermiques. Il peut éventuellement être consolidé (maillage de fils métalliques, amas de sable).

Utilisation

Moulage manuel, en production unitaire à la petite série, de pièces de forme complexe, très petites à moyennes avec des alliages de mauvaise coulabilité.
Les précisions dimensionnelle et d'état de surface sont très bonnes. Les pièces peuvent être minces, sans dépouille ni plan de joint.

2.9 Moulage avec modèle gazéifiable

Moulage en moule et modèle non permanents, avec un modèle en polystyrène expansé ou en polyuréthanne, comprenant la forme de la pièce sans dépouille avec les systèmes de remplissage et d'alimentation. (fig. 10.27).

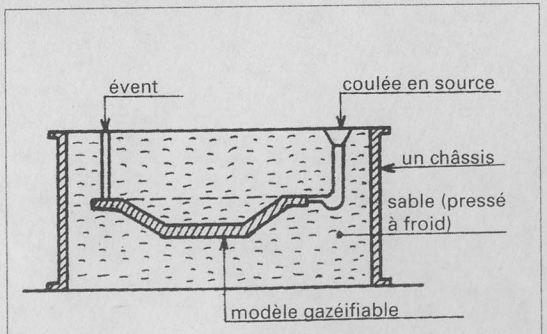


FIGURE 10.27
Schéma du moulage avec modèle gazéifiable.

Modèle et systèmes de remplissage et alimentation

Après installation dans le moule (généralement en une partie) il est détruit par gazéification (dispersé dans le moule) à la coulée de l'alliage.
La coulée, avec le procédé « LOST-FOAM » se fait par dépression.

Moule

En sable siliceux, à prise à froid, il donne une bonne précision de la pièce.
Production unitaire. Le modèle est réalisé par découpage dans le polystyrène en plaque.
Production de série. Le modèle, obtenu par moulage du polystyrène en poudre dans un maître-modèle, est enduit d'une couche réfractaire le rigidifiant.

Production de pièces en alliages de composition chimique précise

Le modèle est détruit avant la coulée (évite un gazéifiage).
Le moule est en deux parties pour éliminer le modèle (par combustion et/ou fragmentation).

Pièces produites

De bonne qualité de forme (absence de dépouille au modèle).

Utilisation

Production de pièces de toutes dimensions, unitaire et en particulier de grande série (par coulée en grappe de petites pièces, avec machine spécifique de fabrication des modèles et unité de production (procédé « LOST-FOAM »).

2.10 Moulage par centrifugation

Moulage en moule non permanent avec modèle réutilisable, donnant son empreinte dans le sable (fig. 10.28).
La coulée s'effectue dans le moule en rotation, pour des pièces essentiellement équilibrées.
L'alliage coulé reçoit une accélération centrifuge de plusieurs dizaines de g (accélération de la pesanteur) donnant une excellente compacité à la pièce obtenue.
Les systèmes de remplissage et d'alimentation sont réduits à un canal central, diminuant la mise au mille.

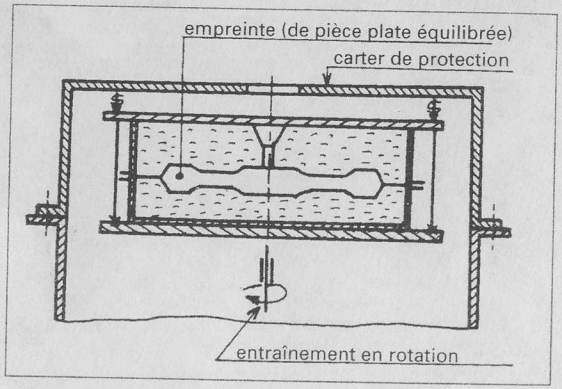
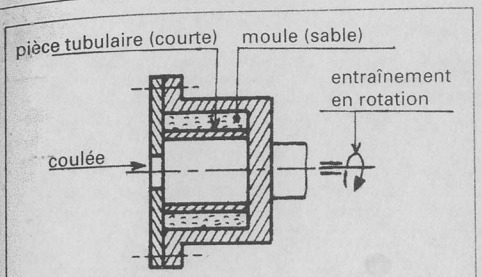


FIGURE 10.28 Schéma de principe du moulage par centrifugation (machine à axe vertical).

Pièces tubulaires courtes (de petit à moyen diamètre)

Elles sont réalisées avec des machines à axe horizontal. Le moule est réalisable également par centrifugation avec sable à prise à froid (fig. 10.29).
La mise au mille est nulle (pas de système d'alimentation et de remplissage, la coulée s'effectuant au centre de la pièce).



Moules. Ils doivent être rigides et maintenus efficacement.

Utilisation

Production unitaire et en série, de pièces tubulaires courtes et de pièces cylindriques plates.

FIGURE 10.29
Schéma de principe du moulage par centrifugation (machine à axe horizontal).

2.11 Moulage V process

Moulage en moule non permanent dont l'empreinte est recouverte d'un film plastique assurant la stabilité du moule durant son utilisation.
Film de plastique. Chauffé et tiré par effet du vide sur le modèle placé dans un châssis avec chambre à vide (fig. 10.30).
En acétate de vinyl éthylène, très moulant, il adhère au sable dans l'empreinte lors du moulage. Il se vaporise, sans brûler, au contact de l'alliage en fusion, formant dans le moule une couche stabilisatrice.
Sable de moulage, quartzeux à grains fins, utilisé à sec, sans liant ni additif, serré énergiquement par vibrations et durci par évacuation de l'air (avec une faible dépression).
L'extraction du modèle est effectuée avec une faible surpression dans l'empreinte.
Le décochage de la pièce est favorisé par la suppression du vide.

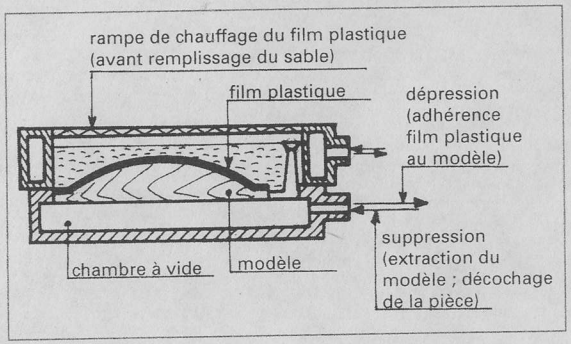


FIGURE 10.30 Schéma de réalisation d'une empreinte en moulage V process.

Pièces obtenues

Elles ont un excellent état de surface et sont de bonne précision dimensionnelle, avec un faible pourcentage de rebut (parfaite adhérence du film plastique thermoformé ; compacité régulière et élevée du moule ; diminution de la trempe superficielle et de la dépouille).
La durée de vie des modèles est accrue.

Sécurité

Les conditions de travail sont améliorées (élimination des bruits, poussières, vapeur et gaz, efforts physiques).

Utilisation

En production automatisée (noyautage, moulage, décochage) de pièces diverses petites et moyennes, de la petite à la grande série.

2.12 Moulage par impact (de Sté Georges Fischer + GF +)

Moulage en moule non permanent, ou le serrage du sable (à vert) dans le moule est obtenu par onde de choc provoquée à l'inflammation d'un mélange air-gaz (donnant une pression de 5 bars dans la chambre de combustion) (fig. 10.31).
Le sable est dosé à la quantité nécessaire pour le remplissage du moule. Son serrage est plus fort du côté du plan de joint, donc sur le modèle.

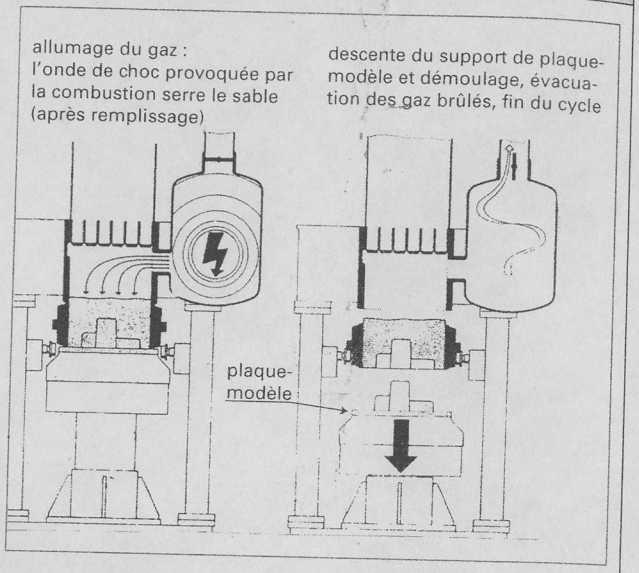


FIGURE 10.31
Réalisation d'une empreinte en moulage par impact.
Doc. Sté Georges Fischer + GF

Moule

Sa forte résistance, obtenue en compression (≅ 30 N/cm²) sur toutes les surfaces de l'empreinte, permet de couler des pièces d'excellentes qualités (dimensionnelle, constance de poids, état de surface, forme) avec un faible pourcentage de rebuts et une réduction de l'ébarbage.

Modèles et plaques-modèles

Ils sont de même conception qu'en moulage avec plaques-modèles métalliques.

Sécurité

Les conditions de travail sont améliorées, par la réduction du bruit en particulier.

Utilisation

Production de série, des pièces en alliages légers, acier, fontes (grise, GS, malléable) de moyennes dimensions avec des machines spécifiques.
Procédé de grande productivité (rapidité de serrage du sable) le rendant très compétitif.

2.13 Inserts métalliques

De la forme d'éléments complémentaires à la pièce coulée (vis, pivot...), ils sont installés dans les empreintes du moule avant la coulée, en moulage avec modèle et plaque-modèle.
Ces formes complémentaires ont leur partie fonctionnelle placée dans le sable, et une autre partie située dans l'empreinte pour insertion dans l'alliage solidifié (fig. 10.32).

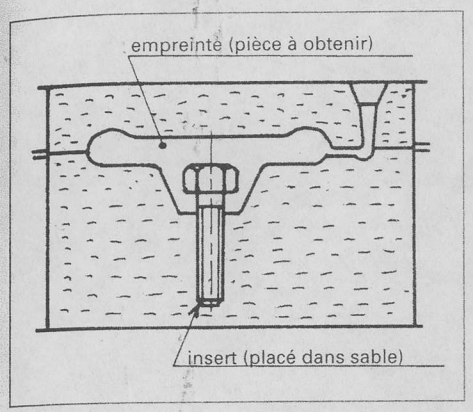


FIGURE 10.32
Schéma de moule avec insert.

Utilisation

En production unitaire et de série pour : obtenir des pièces moulées avec des formes fonctionnelles (filetages, pivots...) sans usinage ultérieur à la coulée (souvent difficile à effectuer).
Avoir un matériau adapté à la fonction (vis en acier dans pièce en alliage léger...)
Simplifier la confection du modèle et du moule.

2.14 Appareillages de moulage non permanent

Châssis

Ils constituent le cadre métallique de maintien du sable, dimensionné pour contenir la pièce à mouler.
Leurs formes, rectangulaires, carrés ou cylindriques et leurs dimensions sont standardisées (de 250 à 5000 mm de longueur ou diamètre et hauteur de 100 à 400 mm) (fig. 10.33).
Ils sont conçus pour le moulage à main et mécanique, avec mise en position (châssis inférieur avec supérieur) assurée par des goujons (2 à 4, selon les dimensions du moule).

FIGURE 10.33
Principales dimensions des châssis.

Valeurs indicatives		
Longueurs l ou Ø D	Hauteurs h courantes	Largeurs mini à maxi
250	100-80	160
315	100-80	250
400	125-100	250-315
500	125-100	250-400
630	125-160	250-500
800	160-200	250-630
1000	160-200	250-800
1250	160-200	315-1000
1600	200-250	400-1250
2000	200-250	500-1600
2500	250-315	500-2000
3150	250-315	500-2500
4000	315-400	500-3150
5000	315-400	630-4000

Boîtes à noyaux

Moules non destructibles conçus pour fabriquer des noyaux en sable nécessaires en moulage manuel et automatique (série).
Elles doivent permettre, après tassement du sable, l'extraction du noyau (le déboîtage) sans le détériorer, ce qui nécessite des éléments de boîtes démontables.

Moulage manuel

Les boîtes à noyaux, en bois, sont à cadre, en caisson, en auge, goujonnées, pour la production unitaire à la moyenne série.
Boîtes à cadre. Cadre sans fond, en deux parties démontables : conception de noyaux très simples en production unitaire à quelques pièces.

Boîtes en caisson et en auge. Constituées de plusieurs éléments assemblés dans un caisson démontable ou en auge, assurant le déboîtage rapide des éléments du moule (fig. 10.34).
À concevoir pour des noyaux complexes, en production unitaire à quelques pièces.

Boîtes goujonnées. En deux parties assurant le déboîtage facile (fig. 10.35).
L'assemblage des deux parties, par goujons et bagues métalliques, assure rapidité et précision de positionnement.
Des éléments intérieurs à la boîte peuvent être démontables pour le démoulage.
Boîtes les plus utilisées en moulage manuel.

Moulage en grande série

On utilise des boîtes à noyaux métalliques ou en résines synthétiques.

Boîtes métalliques. Utilisées sur machine à souffler les noyaux en moulage automatisé. Elles sont conçues pour faciliter le démoulage du noyau et la mise en position des différents éléments du moule (fig. 10.36).

Boîtes en résine synthétique. À partir d'un noyau master, on surmoule des boîtes à noyaux. L'intérieur de la boîte est généralement fretté pour éviter sa rupture.
Coût de fabrication relativement faible.

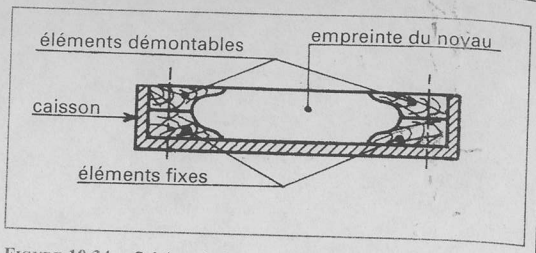


FIGURE 10.34 Schéma de boîte à noyau en caisson.

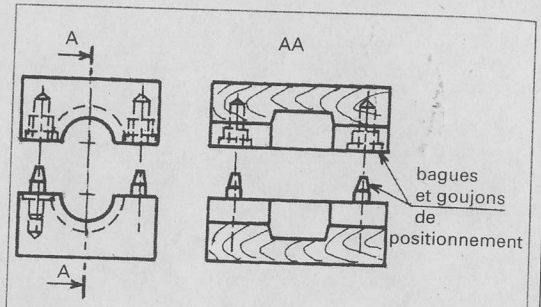


FIGURE 10.35 Schéma de boîte à noyau goujonnée.

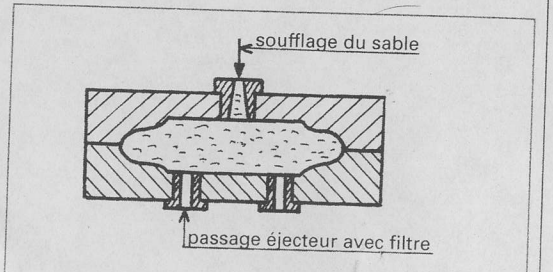


FIGURE 10.36 Schéma de boîte à noyau métallique.

2.15 Machines à mouler les noyaux

Moulage des noyaux dans leurs boîtes respectives, par remplissage et serrage du sable (différemment selon les dimensions des noyaux et la production à assurer).

Gros noyaux

Ils sont réalisés, comme les moules non permanents, sur machines avec pression et secousses.

Noyaux de petites dimensions

Ils sont réalisés en série, sur machine spécifique où le sable est soufflé dans la boîte. Remplissage de la boîte et serrage du sable sont rapides (la prise est limitée à une carapace de ≅ 10 mm) (fig. 10.37).

Production de grande série

Le sable est projeté dans la boîte, en émulsion avec l'air comprimé.

Boîte chaude

Les noyaux peuvent être obtenus en boîte chaude, comme les modèles; le sable, enrobé de résines, est soufflé dans la boîte à noyaux contenue dans une chambre métallique chauffée (≅ 200 °C) et durci rapidement en carapace (≅ 10 mm).

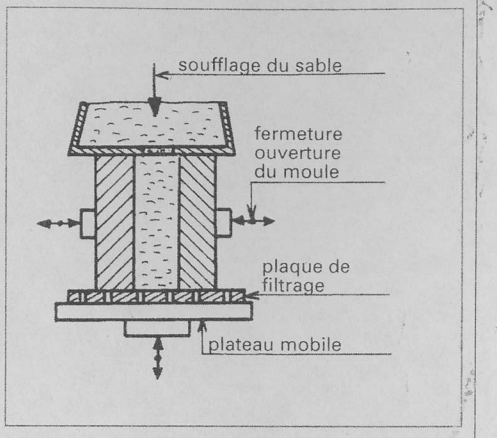


FIGURE 10.37 Schéma de principe de soufflage de noyau (moule à ouverture horizontale).

2.16 Machines à mouler

Pour moules non permanents. Moulage des empreintes, dans un châssis ou dans une motte, par serrage du sable autour du modèle démoulable (situé d'un côté du plan de joint) et extraction du modèle.
Le serrage du sable s'effectue, selon la production à assurer, sous basse ou haute pression.

Moulage sous basse pression (1,5 à 5 bars)

Il est utilisé pour la production de pièces de forme simple, sans précision particulière, avec un maximum de 50 pièces/heure (fig. 10.38).
Il est obtenu par pression et secousses (300 à 400 coups/min) de faibles amplitudes.

Moulage de grandes pièces

Le serrage s'effectue simultanément au remplissage du châssis.

Extraction du modèle

Son démoulage s'effectue :
Directement après moulage pour les formes simples.
Par retournement pour les formes complexes (le sable porte-moule bascule).

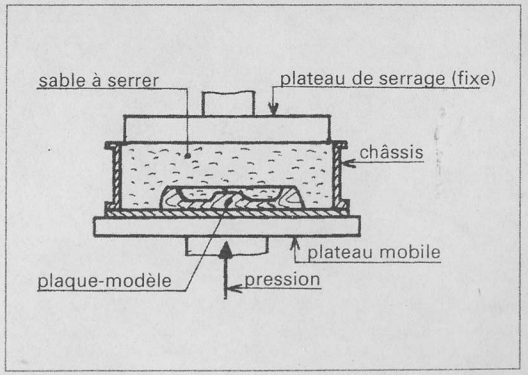


FIGURE 10.38 Schéma de poste de serrage du sable par pression.

Moulage sous haute pression (6 à 15 bars)

Il est utilisé pour la production de série, en châssis ou en motte.
Le serrage du sable, en moulage en châssis, s'effectue par pression hydraulique (agissant sur une membrane souple, ou un groupe de pistons) (fig. 10.39).

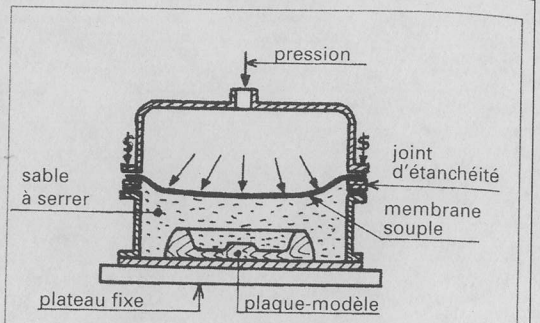


FIGURE 10.39
Schéma de poste de serrage du sable sous haute pression

3. Moulage en moule permanent

3.1 Généralités

La mise en œuvre de chacun des procédés de moulage en moule permanent nécessite la fabrication – par usinage – de l'outillage métallique nécessaire (moule, noyaux et broches, systèmes de remplissage, d'alimentation et d'éjection).
Un outillage assure la production de plusieurs milliers à plusieurs millions de pièces, selon les procédés.
Des appareillages complémentaires sont à concevoir pour optimiser le processus par mécanisation ou automatisation.
Les différents procédés sont : moulage en coquille par gravité, moulage sous haute pression, moulage en basse pression, moulage en contre-pression, moulage par centrifugation.

3.2 Moulage en coquille par gravité

Procédé de moulage en moule permanent, ou coquille ; tous les éléments constitutifs de l'outillage (blocs, empreinte, semelle, chapes, noyaux, broches, poussoirs, éjecteurs...) sont métalliques, ce qui permet d'effectuer des coulées de pièces, successivement, avec le même moule jusqu'à son usure (fig. 10.40).
Le moulage (fermeture du moule, remplissage et alimentation de l'alliage, démoulage de la pièce) est mécanisé ou automatisé.

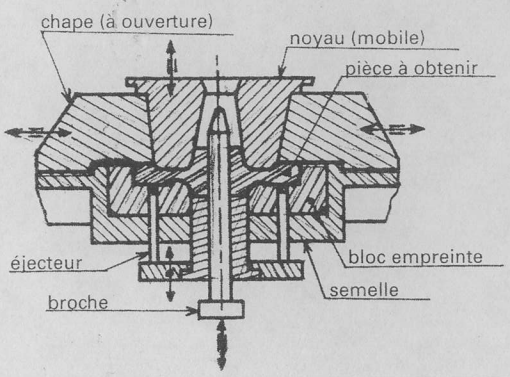


FIGURE 10.40
Schéma de coquille en moulage série.

Moule

Il est constitué de plusieurs éléments : une semelle, des chapes, des refroidisseurs, des noyaux, des broches, (en coulée par gravité), le système d'éjection. Il comporte les systèmes de remplissage et d'alimentation.

Semelle

Elle supporte les chapes avec leur guidage pour ouverture-fermeture du moule. Elle peut contenir un bloc porte-empreinte d'une partie de la forme extérieure de la pièce.

Chapes

Chacune des (deux) chapes comporte l'empreinte d'une partie de forme extérieure de pièce. Elles coulissent sur la semelle pour l'ouverture du moule.

Noyaux

Ils donnent généralement des formes intérieures de la pièce.
Ils sont mobiles et doivent être mis en position et centrés avec un guidage efficace.
Leur direction de démoulage, verticale, oblique ou horizontale, sera fonction des formes de la pièce. Très échauffés durant la coulée, ils peuvent être refroidis par une circulation fluide (air ou eau) (fig. 10.41).
Un noyau pourra être conçu en plusieurs parties pour permettre le démoulage.
Ils peuvent être éventuellement en sable, pour de petites séries.

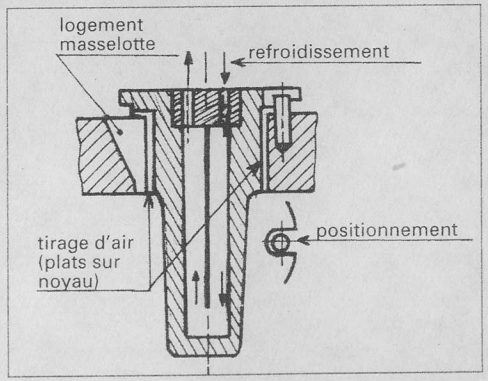


FIGURE 10.41 Noyau avec positionnement, tirage d'air et refroidissement.

Broches

Elles sont des noyaux de faible section (cylindrique) et de grande longueur pour le moulage d'alésages longs. Elles sont guidées aux deux extrémités, éventuellement (fig. 10.42).

Remplissage de l'empreinte

Il doit être le plus rapide possible : l'échange thermique entre moule et alliage ne doit pas se refroidir trop rapidement.

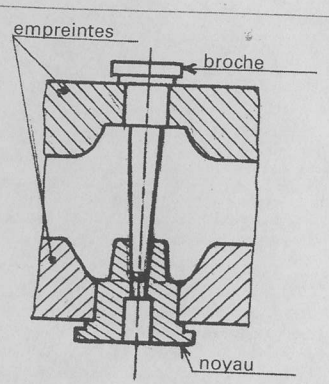


FIGURE 10.42 Broche guidée aux deux extrémités.

Le système de coulée (descente, canal, attaque(s)) réalisé dans le joint des chapes, est conçu en fonction de l'attaque de coulée en chute, en source, latérale (fig. 10.43), soit :

Coulée en chute

Par le haut de la pièce dans la masselotte (qui se solidifie en dernier) permettant un refroidissement minimum de l'alliage à la coulée et une solidification bien dirigée. Afin que l'air contenu dans l'empreinte puisse s'évacuer, prévoir des tirages d'air :
Saignées et méplats sur les surfaces de joint des chapes et des guides de noyaux ;
Goupilles d'air dans des parois du moule.

Coulée en source

Sous la pièce, facilitant l'évacuation de l'empreinte.

Coulée latérale

Elle est nécessaire pour situer l'attaque sur la partie mince de la pièce.

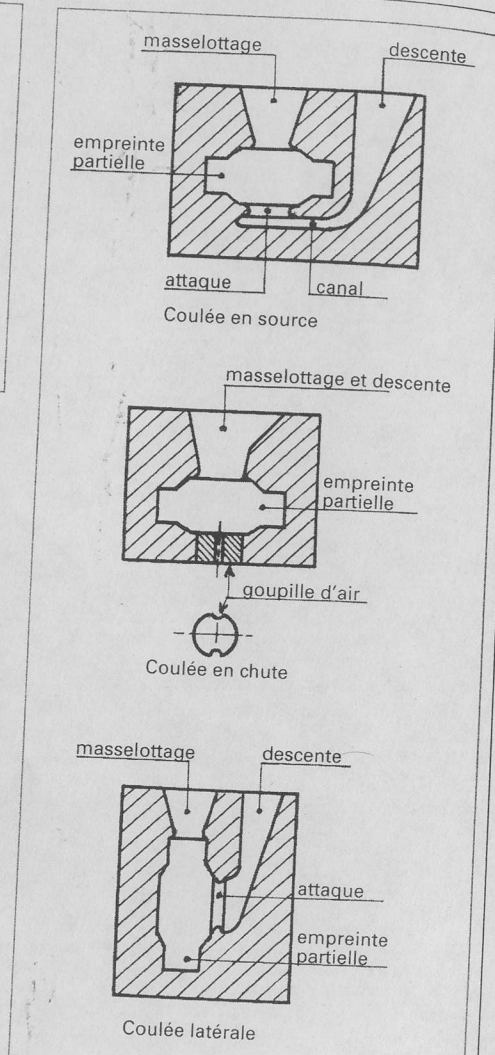


FIGURE 10.43 Schéma des systèmes de coulée.

Alimentation

Elle assure le remplissage des empreintes pendant la solidification.
Rechercher à diriger la solidification des parties minces vers les parties hautes et à évacuer la chaleur hors du moule (refroidir par masselottes, poteyage, épaisseurs de chape, noyaux).

Refroidisseur

Un métal bon conducteur de la chaleur, à situer contre une partie massive (fig. 10.44).
L'épaisseur des coquilles agit également en refroidisseur : en fonction des différentes épaisseurs d'une pièce à obtenir, on admet 20 mm pour les parties minces à 60 mm pour les parties très épaisses.

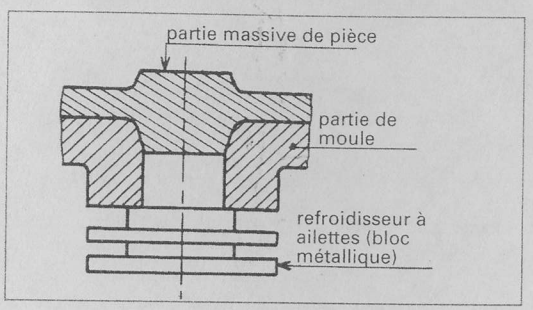


FIGURE 10.44
Refroidisseur sur partie massive d'une pièce.

Masselottes

À situer près des volumes à solidifier en dernier : dans les chapes ou dans des chapes spéciales (chapes à jet).

Poteyage

Dépôt d'enduit spécifique dans l'empreinte et sur des éléments de moulage (noyaux, broches...) : agit sur l'évacuation de la chaleur (protection thermique de l'empreinte) et facilite le démoulage. La conductibilité de la chaleur est facilitée avec le poteyage.
Le poteyage noir facilite la conductibilité thermique.
Le poteyage blanc s'oppose à la conductibilité thermique.

Systèmes d'ouverture-fermeture

Ils sont mécanisés (pignon-crémaillère...) ou automatisés (vérins hydrauliques ou pneumatiques) selon l'importance de la production à assurer.
Le verrouillage des coquilles entre elles, avant la coulée, doit être efficace : assuré par le système d'ouverture-fermeture, ou par des crampes en petite série.

Système d'éjection

Il comprend des éjecteurs, généralement cylindriques, commandés par les plaques d'éjection (mouvements aller-retour).
Il est actionné par le système d'ouverture du moule.
L'éjection provoque l'extraction de la pièce solidifiée dans l'empreinte.
Le démoulage est facilité par les dépouilles (1 à 3°) et un important poteyage.
La pièce doit être retenue dans l'empreinte située du côté de l'éjection (par une faible dépouille et la forme de l'empreinte).
Les éjecteurs sont répartis sur la face de la pièce, opposés aux zones les moins déformables (fig. 10.45).

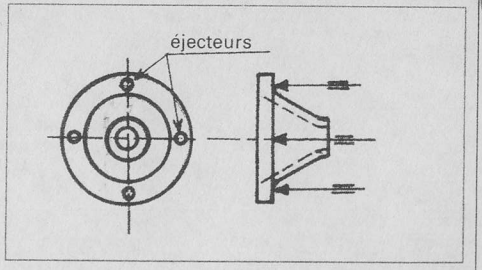


FIGURE 10.45 Position des éjecteurs sur une pièce.

Matériaux

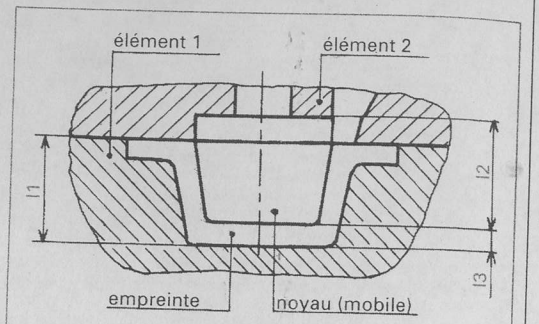
Les moules devraient pouvoir conserver leurs caractéristiques mécaniques sous une température relativement élevée (jusqu'à 500 °C pour certains éléments).
On utilisera principalement les aciers 35 NC D 16, 30 CD 12, 30 NC 11, Z 10 NC S 19-15, et la fonte grise lamellaire perlitique.

Pièces obtenues

Les pièces à couler en coquille sont obtenues avec plus de précision que par la coulée en sable, soit :

Précision dimensionnelle

Elle est déterminée en fonction du matériau et de la grande dimension de la pièce ; elle varie selon la position de la cote considérée dans l'empreinte.
On admet, pour les alliages légers, un intervalle de tolérance minimal de quelques dixièmes de mm (≅ 0,3 pour petites pièces). On peut appliquer la formule :
IT = k1 + k2 × l, avec k1 = 0,2 à 0,4 ; k2 = 1,5/1 000 à 2,5/1 000 ; l cote considérée (contenue dans un, deux ou trois éléments constitutifs du moule) (fig. 10.46).



l	k	h
l_1	0,20	1,5/1000
l_2	0,30	2/1000
l_3	0,40	2,5/1000

FIGURE 10.46 Données pour déterminer la précision dimensionnelle minimale des pièces coulées en coquille.

Surépaisseur d'usinage

Elle se définit en fonction de la plus grande dimension de la pièce, selon les matériaux coulés. Pour les alliages légers, elle varie de 1 à 2,5 mm selon la grandeur des pièces. On applique une formule indiquant cette surépaisseur S en fonction de la plus grande longueur de pièce L, soit : S = 1 + 3 L/1000.

Dépouille

Elle est faible (1 à 3°) et varie en fonction de la position des formes à obtenir (en extérieur ou en intérieur de la pièce), et de l'extraction de la pièce (la pièce devant s'extraire de l'empreinte dépourvue d'éjecteurs à l'ouverture du moule) (fig. 10.47).

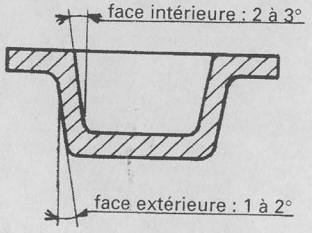


FIGURE 10.47 Dépouilles sur les pièces coulées en coquille.

Trous de petit diamètre

Ils s'obtiennent brut de coulée, à partir d'un minimum de 4 mm et pour des profondeurs en rapport avec le diamètre (de 3 à 6 ∅) avec une dépouille de 0°30 à 2°, en fonction des diamètres (elle est maxi pour les plus petits diamètres).

Utilisation

En production de petites séries répétitives, pour des pièces de dimensions petites à moyennes, en alliages d'aluminium et de cuivre.

3.3 Moulage sous haute pression

Procédé de moulage en moule permanent dont l'outillage, métallique, est en deux parties. L'alliage en fusion est injecté sous pression dans l'empreinte, en un temps très court (1/10 de seconde) avec une surpression sur l'alliage coulé pour compenser le retrait de solidification. Le moulage s'effectue avec des machines spécifiques à ouverture-fermeture horizontale où toutes les opérations sont automatisées : production de grande série (10 000 pièces minimum à plusieurs millions).

Moule

Il est constitué de deux blocs (en acier) fixés l'un sur un plateau fixe (coté injection de l'alliage), l'autre sur un plateau mobile (côté éjection de la pièce) (fig. 10.48).
À la fermeture du moule, les blocs sont centrés l'un par rapport à l'autre (goujons...) ; leur maintien en position fermée doit être efficace (par vérin de manœuvre...).

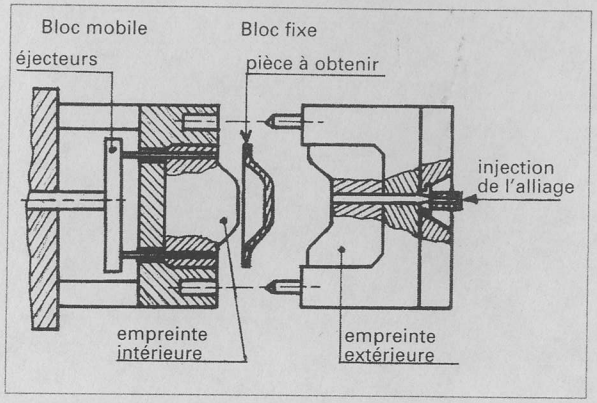


FIGURE 10.48 Schéma du poste de moulage de machine à moule haute pression.

Bloc fixe

Carcasse recevant l'empreinte (ou une grande partie) de formes extérieures de la pièce à obtenir.

Bloc mobile

Carcasse recevant l'empreinte des formes intérieures démoulables dans le sens d'ouverture du moule.

Noyaux et broches

Ils sont fixes ou mobiles, selon leur position dans le moule.
Montés de préférence sur le bloc mobile, facilitant la venue de la pièce (démoulage).

Noyaux et broches fixes

Se démoulent dans le sens d'ouverture du moule.
Amovibles pour un remplacement périodique (fortes sollicitations thermiques et mécaniques) (fig. 10.49).

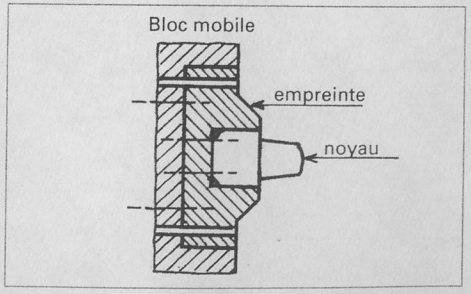


FIGURE 10.49 Noyau dans une empreinte de moule haute pression.

Broches très longues. Sont maintenues en position dans le demi-moule opposé (fig. 10.50).

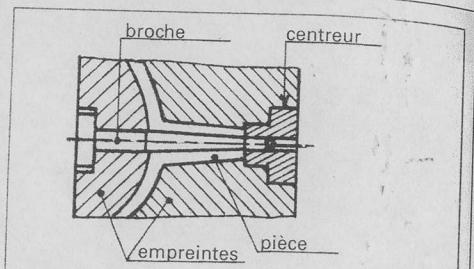


FIGURE 10.50
Broche longue dans un moule haute pression (maintenue dans les deux empreintes).

Noyaux et broches mobiles

Ne se démoulent pas dans le sens d'ouverture du moule.
Guidés cylindriquement ou prismatiquement (en tiroir) dans le bloc : positionnement et dégagement automatiques.

Remplissage de l'empreinte

Il doit être effectué très rapidement en écoulement le moins turbulent possible pour opposition à : oxydation, formation de gouttes froides, émulsion air-alliage.
Le temps de remplissage étant très court (quelques dixièmes de seconde au maximum) la vitesse de remplissage (20 à 50 m/sec) augmentera avec le minimum de toile de la pièce.

Diffuseur

Situé dans le bloc mobile, il dirige l'alliage dans la buse d'injection suivant le meilleur écoulement et réduit la quantité injectée (diffuseur, économiseur).
La buse d'injection est située dans le bloc fixe.
Le refroidissement du diffuseur et de la buse d'injection est nécessaire (circulation d'eau) (fig. 10.51).

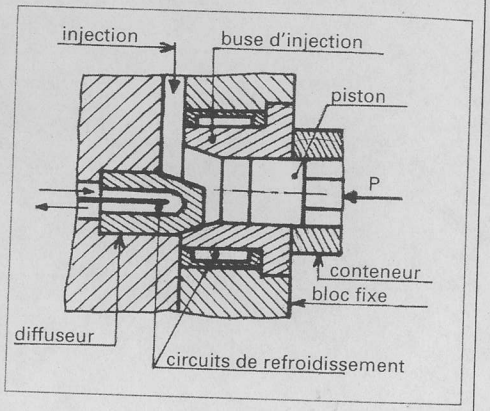


FIGURE 10.51 Schéma de diffuseur pour moule haute pression (en chambre froide).

Attaque de coulée

Elle assure l'écoulement de l'alliage et régule la vitesse de remplissage de l'empreinte.
Elle est située, en principe, au droit des parties minces à couler.
Une partie épaisse peut avoir son attaque spécifique ou plusieurs attaques (remplissage de deux côtés d'un noyau) (fig. 10.52).

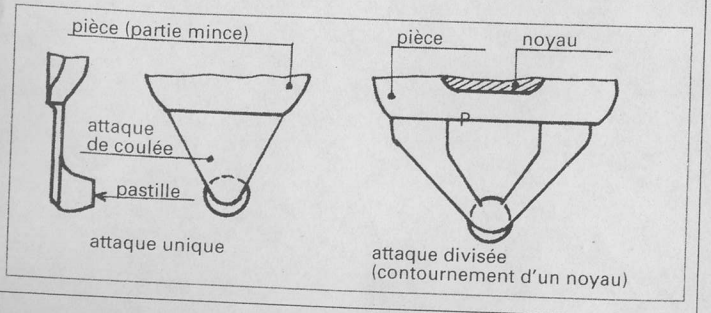


FIGURE 10.52
Attaques de coulée dans moule haute pression.

Une seule attaque est préférable pour les alliages d'aluminium (évite l'oxydation).
La hauteur de l'attaque est fonction de l'épaisseur de la toile des pièces à obtenir (2 à 3,5 mm pour pièces en alliages d'aluminium, 0,5 à 1,5 mm pour pièces en zamak).

Canal de coulée

Assure le remplissage sans perte de pression de la carotte à l'empreinte, d'où la condition : section de départ du canal ⩾ section de l'attaque (fig. 10.53).
Les canaux de coulée des moules utilisés sur machines de moulage à chambre chaude sont directs : réduction du temps de remplissage et de l'oxydation de l'alliage.

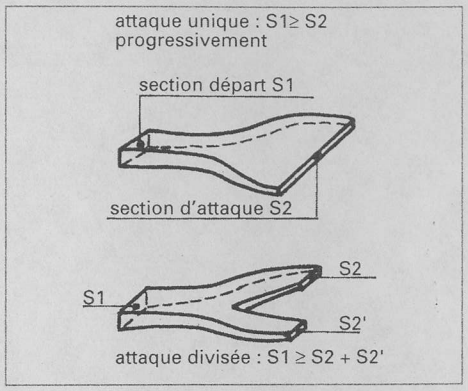


FIGURE 10.53
Canaux de coulée pour moules haute pression.

Dégorgeoirs, ou talons de lavage

Situés en opposition à l'attaque, ou contre des parties minces de la pièce : assurent le réchauffage localisé du moule et reçoivent les premières veines de l'alliage souillé d'oxydes et de gouttes froides.

Tirages d'air

Obtenus par : le jeu des assemblages mobiles du moule (noyaux, broches...) ; éventuellement, une saignée sur une face de joint du moule, à la suite du dégorgeoir.

Alimentation

Assurée, après remplissage, par la pression du piston d'injection sur l'alliage, durant sa solidification dans le moule.
La réserve d'alliage, carotte ou pastille, se situe dans la buse d'injection (du bloc fixe).

Système d'ouverture-fermeture-éjection

Ces mouvements sont effectués automatiquement et rapidement par un vérin.

Éjection de la pièce

Elle est obtenue, généralement, par des poussoirs (les éjecteurs) guidés par des plaques-supports.
Les éjecteurs de forme cylindriques et de petit diamètre (2 à 10 mm) sont situés avec répartition de l'effort, en face des parties massives de la pièce, du canal de coulée et du dégorgeoir (fig. 10.54).

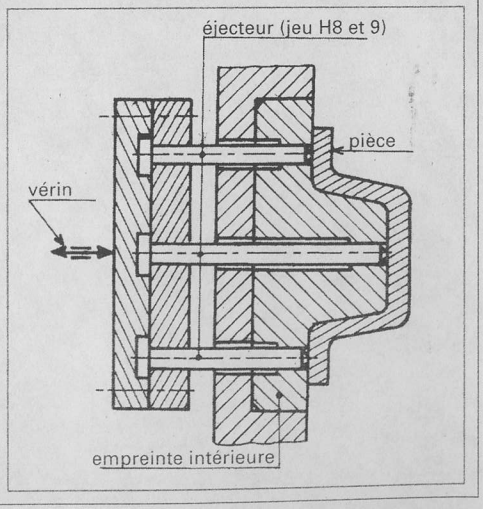


FIGURE 10.54
Système d'éjection de pièce dans moule haute pression.

L'éjecteur est circulaire autour d'un pivot, sur une face de faible épaisseur (fig. 10.55).

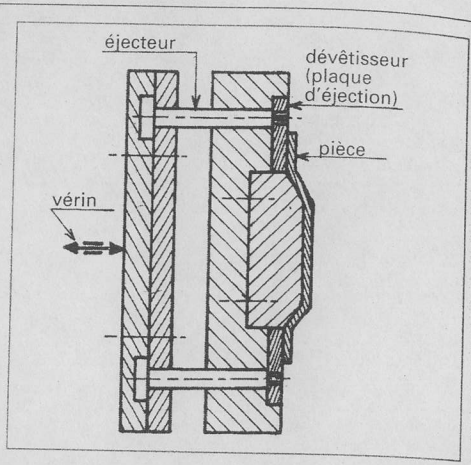


FIGURE 10.55
Système d'éjection surfacique pour pièce mince.

Équilibre thermique d'un moule

Il est stabilisé lorsque, dans le cycle de production, la température de l'alliage s'équilibre avec celle dissipée dans le moule (évacuée par le refroidissement de l'eau additionnée d'un conducteur thermique).

Matériaux

L'utilisation permanente des moules (production continue) implique des matériaux de construction ayant les caractéristiques pour résister aux fortes contraintes thermique et mécanique.
On utilise des aciers alliés, tels que :
Moulage des alliages d'aluminium, de magnésium, de zinc : utiliser la nuance Z 35 CDVS 05.
Moulage d'alliages de cuivre : utiliser la nuance Z 35 KWC 05-04.
Plateaux supports du moule : en acier de nuance 25 CD4 à 42 CD4.

Précision

Les pièces obtenues sont de qualité et avec précision de répétabilité.
Les tolérances dimensionnelles varient en fonction : des dimensions et des matériaux des pièces coulées ; de la position des faces de pièce dans l'empreinte. On admet :
Pour alliages d'aluminium, de magnésium et de zinc :
Faces parallèles au sens d'ouverture du moule : IT de 0,05 à 0,4 mm.
Faces perpendiculaires au sens d'ouverture du moule : IT de 0,10 à 0,8 mm.
Pour alliages de cuivre :
Faces parallèles au sens d'ouverture : IT de 0,07 à 0,60 mm.
Faces perpendiculaires au sens d'ouverture : IT de 0,20 à 1,00 mm.

Conception des pièces

Épaisseur des parois

Elle peut être faible, de 0,5 à 3 mm, avec une dépouille de 0°30 à 1°30 (fig. 10.56).

Trous de petit diamètre

Ils s'obtiennent brut de coulée à partir du diamètre 3 mm, profondeur de 2 à 5 diamètres en moyenne (10 diamètres pour le zinc).

Leur dépouille varie de 0°30 à 2°30 en fonction des diamètres (elle diminue avec l'accroissement du diamètre) (fig. 10.56).

Petites pièces

Elles sont coulées en grappes, optimisant le coût du moule et la productivité.

Machines

Elles sont de type horizontal, à chambre chaude ou à chambre froide.
Le moulage est entièrement automatisé (remplissage et alimentation de l'alliage, fermeture et ouverture du moule, éjection de la pièce).

Machines à chambre chaude

Elles comprennent le four de maintien en température de l'alliage, le système de remplissage, la chambre chaude immergée dans l'alliage en fusion. Elles ont une force de fermeture (pression au joint du moule) de 5 à 1500 tonnes.

	Alliages aluminium	Cuivre	Zinc
Parois			
Dépouille mini :			
intérieure et extérieure	0°30	1°	0°30
Épaisseur mini :			
pièce dans cube.			
≤ 30	1	1,5	0,5
30 ≥ 100	1,5	2	1
100 ≥ 200	2	2,5	1,5
< 200	2,5	3	2
Trous			
Dépouille mini :			
Ø ≤ 5	2°30		1°30
5 ≥ 10	2°	2°	1°
< 10	1°	1°30	0°30
Profondeur maxi :			
Ø = 3	5		20
3 ≥ 10	50	50	100
< 10	Ø × 5	Ø × 5	Ø × 10

FIGURE 10.56 Moulage haute pression : dépouilles et épaisseurs de parois ; dépouilles et profondeurs de trous.

Machines à chambre froide

Elles comprennent une chambre (le conteneur) dans laquelle est déversé l'alliage en fusion à chaque injection (par un piston coulissant dans le conteneur). Elles ont une force de fermeture de 50 à 4000 tonnes.

Utilisation

En production de grande série, répétitive ou continue pour des pièces :
– En alliages d'aluminium et de cuivre, avec les machines à chambre froide.
– En alliages de zinc et de magnésium, avec les machines à chambre chaude.

3.4 Moulage sous basse pression

Procédé de moulage en moule permanent où l'alliage en fusion est injecté dans l'empreinte sous une pression de 0,2 à 2 bars (entre le remplissage et le masselottage).
Les différentes pressions, appliquées dans le four, font monter l'alliage dans le tube de liaison creuset-moule remplissant l'empreinte (fig. 57).

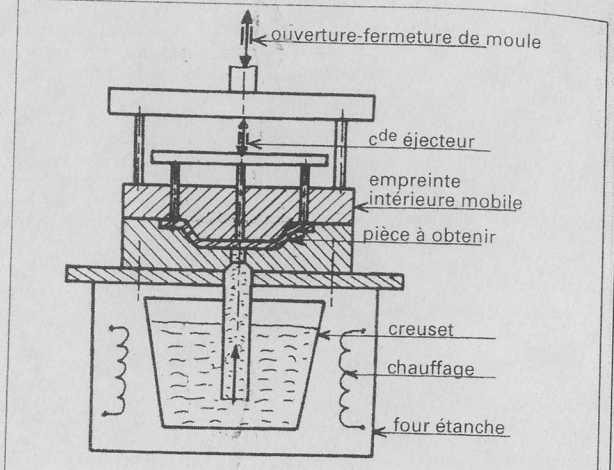


FIGURE 10.57
Schéma de principe de machine à mouler basse pression.

Moule

Métallique, situé au-dessus du creuset du four (étanche) de maintien en température.
Les deux blocs constitutifs du moule se séparent au démoulage.
Le démoulage peut être facilité par le dégagement du moule (basculement, rotation...).

Jeux fonctionnels de l'outillage

Ils sont de quelques dixièmes de mm (plus important qu'en haute pression, la température de régime du moule étant plus élevée).

Tirage d'air

Il est assuré par des rainures peu profondes (0,2 à 0,5 mm) et de faible largeur (10 à 20 mm) sur les joints de chape et portées de noyaux, débouchant à l'extérieur (directement ou par collecteur). Ces rainures sont évasées pour favoriser l'écoulement (fig. 10.58).

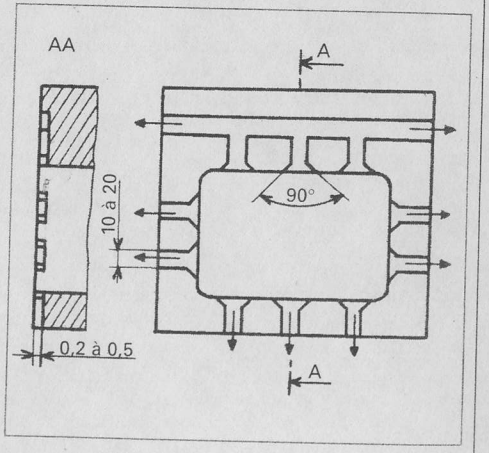


FIGURE 10.58
Tirage d'air sur joint de moule basse pression.

Conception

Elle est délicate, pour assurer la direction de la solidification.
Une régulation thermique de certains éléments pourra être nécessaire, à la mise en production.

Remplissage de l'empreinte

Il s'effectue coulée par le bas en source. La pièce doit être située dans le moule, masses en bas, en liaison avec l'attaque de coulée et le masselottage.
Remplissage et masselottage sont de même section (tube de liaison-injection) pour un remplissage non turbulent.

Plusieurs attaques de coulée

Alimentation d'une partie massive : le temps de remplissage doit être inférieur au temps de solidification de la plus faible épaisseur de paroi.
Le diamètre du col de remplissage (la carotte) est fonction des pièces (poids, épaisseur des toiles, profil) (fig. 10.59).

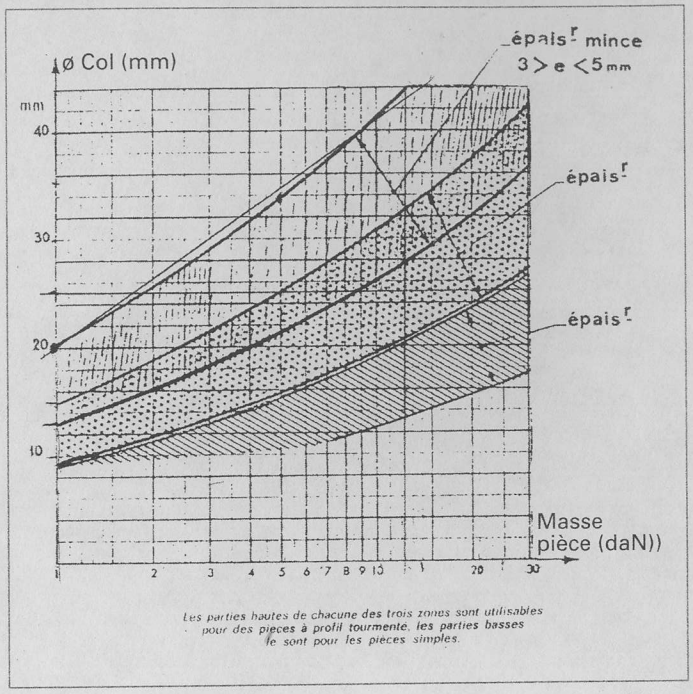


FIGURE 10.59
Diamètre des cols de remplissage pour moule basse pression.
Doc. l'aluminium français.

Matériaux

Ils sont identiques à ceux du moulage sous haute pression.

Précisions

La précision dimensionnelle obtenue est sensiblement inférieure à la coulée sous haute pression.
La mise au mille est excellente, de 1,05 à 1,20 : la masselotte n'est pas solidifiée.
La coulée en source provoque peu d'oxydation et la pression donne une venue de pièce comparable à la coulée en chute.

Conception des pièces

Elles doivent être conçues pour la coulée sous pression, avec une épaisseur progressive de l'attaque à l'extrémité opposée (haut de la pièce) (fig. 10.60).
Elles auront un axe de symétrie (pièces cylindriques) avec une grande surface et une faible épaisseur.
Les alliages utilisés ne doivent pas avoir une tendance à la criquabilité.

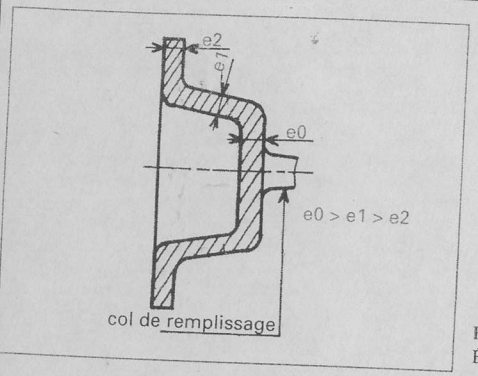


FIGURE 10.60
Épaisseurs des toiles en moulage basse pression.

Machines

Pour produire en grande série, chaque machine est conçue avec four de maintien en température de l'alliage et automatisation totale (coulée de l'alliage à extraction de la pièce.
Elles sont de deux types : à injection verticale (le moule est au-dessus du four, avec tube d'injection plongeant dans le creuset) ; à injection oblique (le moule est dégagé du four).

Utilisation

Production de grande série de pièces cylindriques courtes et plates de petites à moyennes dimensions et de masse maximale ≅ 100 kg.

3.5 Moulage en contre-pression

Procédé de moulage en moule permanent, où l'alliage en fusion est injecté sous basse pression dans l'empreinte où règne une contre-pression.
La différence provoquée des pressions opposées permet le remplissage à la vitesse désirée (régulée linéairement et avec rapidité).
Après mise à même pression P1 du creuset et du moule, la pression dans le moule est abaissée à P2, tel que la différence de pression injecte l'alliage en fusion dans le moule.
Après cristallisation de la pièce obtenue, l'équilibre des pressions P1 et P2 est rétabli, provoquant le retour au creuset de l'alliage non solidifié (fig. 10.61).

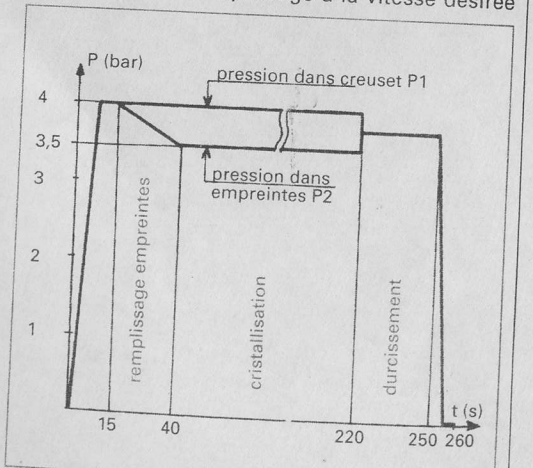


FIGURE 10.61
Cycle des pressions durant le moulage en contre-pression.

Poteyage

Il a une longue durée, la coulée étant effectuée avec le moule moins chaud qu'avec les autres procédés (la compression régulant le remplissage).
Le cycle automatisé de la machine (spécifique) permet une grande productivité.

Précision

Pièces produites avec un faible pourcentage de rebuts et de grandes qualités (régulation du processus de formation et de structuration).
Le masselottage et la section d'attaque de coulée sont réduits.

Matériaux moulés

Tous les matériaux de fonderie sont moulables par ce procédé, à vitesse de coulée d'environ le double de la basse pression.
Les alliages recyclés sont moulables, le degré de pureté de l'alliage étant sans influence sur les caractéristiques mécaniques des pièces obtenues.

Machines

Elles sont entièrement automatisées et de grande productivité.
Le moule et le creuset sont hermétiques, les gaz et les vapeurs sont captés, améliorant les conditions de travail.

Utilisation

Production de pièces moyennes de grandes qualités : métallurgique (faible formation de micro-retassures et de porosité) ; mécanique (résistance à la traction, limite d'élasticité, allongement, dureté).
Avec de nouveaux alliages métal-gaz, le procédé permet de produire des pièces, concurremment aux autres procédés de moulage permanent.

3.6 Moulage en centrifugation

Moulage en moule permanent de pièces tubulaires, sans noyautage, avec une mise au mille réduite (remplissage directement dans le moule).
L'alliage en fusion coulé dans le moule (de section cylindrique) est entraîné en rotation. Une accélération est appliquée à l'alliage (de 20 à 40 g) qui se solidifie sur la périphérie intérieure du moule (fig. 10.62).
La quantité d'alliage déversée dans le moule détermine l'épaisseur de la pièce obtenue. Éventuellement, un trop-plein peut recevoir un excès de coulée.
Le masselottage est « partiellement éliminé » ;
Le système de remplissage est simplifié (un déversoir et canal de coulée).

Moule

Généralement métallique et en une pièce, éventuellement en deux demi-coquilles pour démoulage de profils extérieurs non rectilignes.
Selon l'importance de la série et l'alliage à couler, les moules sont :

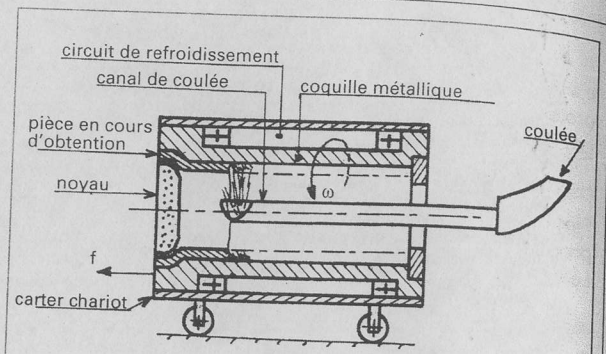


FIGURE 10.62
Schéma de principe du moulage par centrifugation horizontale (pièces longues).

Métalliques

En acier, pour production de grande série.
Ils peuvent être refroidis, par eau ou par air, avec un recuit des pièces obtenues pour annuler l'effet de trempe.
Un moule en acier produira jusqu'à ≅ 4 000 pièces ; en fonte, la quantité maximale est ≃ 1 000 pièces.

En graphite

Pour moulage d'alliages de cuivre, une frette métallique consolidera le moule.

Précisions

La précision de forme est bonne (remplissage en continu dans l'empreinte).
L'ébarbage et un usinage éventuel de finition sont réduits.
Métallurgie. Structure affinée (gradients de température autour du moule) ; excellente compacité (centrifugation) ; ségrégation centralisée des oxydes et impuretés (faible masse volumique).

Noyautage

Un noyau cylindrique court, en sable, peut être placé à une extrémité de pièce (fig. 10.62).

Machines

À axe vertical ou oblique

Production de pièces courtes (diamètre ≅ hauteur).
Les pièces courtes de grand diamètre sont coulées avec machine à axe vertical (fig. 10.63).
Les pièces coulées avec machine à axe oblique ont l'intérieur en forme parabolique.

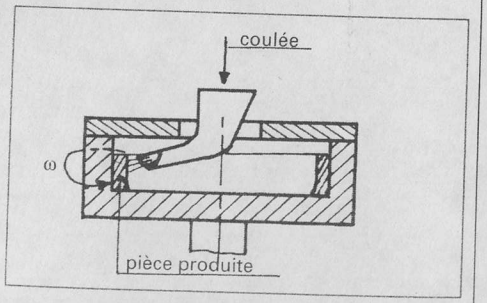


FIGURE 10.63 Schéma de principe du moulage par centrifugation verticale (pièce courte, de grand diamètre).

À axe horizontal

Production de pièces longues (plusieurs mètres).
Ces machines ont deux mouvements de génération (rotation du moule et translation axiale.

Utilisation

Production de pièces moulées de section cylindrique, courtes et longues, en alliage à forte masse volumique de préférence (vitesse de rotation du moule non excessive).
Des pièces en alliages composites sont réalisables par coulée de couches successives (sous-couche précédente solidifiée).

4. Moulage par compression des poudres et frittage

4.1 Généralités

Les poudres métalliques sont comprimées dans un moule, puis frittées par chauffe du comprimé (la pièce) sous vide ou à atmosphère contrôlée, d'une température inférieure à celle de fusion de l'élément principal.

4.2 Poudres métalliques

Elles sont généralement obtenues par atomisation avec un jet fluide (gaz, azote...) attaquant le métal qui éclate et se refroidit en gouttelettes formant des grains de poudre d'excellente compressibilité (fig. 10.64).

Désignation

Elles sont définies, selon la normalisation, par leurs principales caractéristiques, densité apparente, vitesse d'écoulement, granulométrie, compressibilité, et d'autres caractéristiques telles que : composition chimique, expansion, résistance à vert...
Leur désignation est normalisée (NF A-95-711) par F C Z- A B-m (fig. 10.65).

Densité apparente

Densité d'une poudre non tassée ; elle permet de déterminer la quantité de remplissage des moules (ou matrices) et se définit par : poids de poudre/son volume non tassé.

Résistance à vert

Résistance de la poudre comprimée ; elle permet de déterminer l'aptitude à la manutention des pièces après compression (et avant frittage).

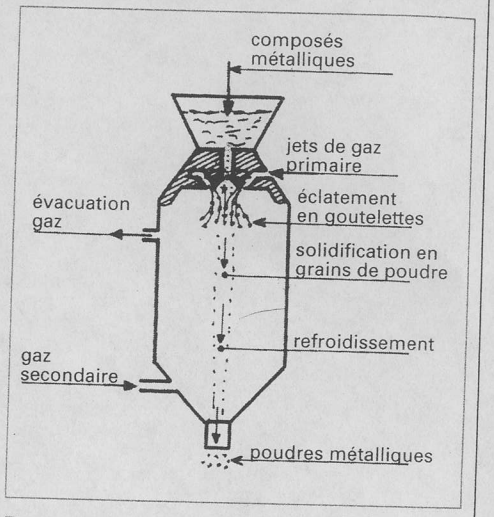


FIGURE 10.64 Schéma d'obtention des poudres métalliques par atomisation.

F – C – Z – A,B... m	
F –	**Méthode de fabrication**
F :	Frittage
Fj :	Frittage avec infiltration
C –	**Centième de %. Teneur en carbone**
C :	Pour acier non allié
Cg :	pour graphite
Z –	**Élément de base et teneur**
A, B... %	**Éléments d'addition et teneur**
	Par ordre de teneur décroissante
Fe	non indiquée pour alliages ferreux
m × 10 :	**Classe de masse volumique**

FIGURE 10.65 Désignation des matériaux frittés.

Porosité

La poudre comprimée est poreuse, ce qui permet de produire des pièces très fonctionnelles (autolubrification, infiltration...)
Pour utilisations spécifiques, cette porosité est utilisée en y infiltrant un liquide ; éliminée par une phase de forgeage.

4.3 Caractéristiques des pièces

Les pièces compressées-frittées, constituées dans un alliage (ou pseudo-alliage) bien défini, ont comme caractéristiques :

Caractéristiques mécaniques

Résistance à la rupture

Par rapport au métal non fritté Ro, on a la relation pratique :
R = Ro/100.(100-2p)(exemple fig. 10.66), avec p = porosité en % du volume fritté.
La résistance à la rupture diminue avec l'augmentation de la porosité (exemple fig. 10.66).

Pression de compactage	Fritté	Fritté, trempe maturation	Fritté, trempe revenu
0,8	24,5	30,5	36
1,3	29,2	35,6	46,8
3	30,3	38	49,2

FIGURE 10.66 Exemple de variation de résistance à la rupture par traction d'une poudre d'aluminium.

Allongement à la traction A %

Il augmente avec la résistance à la rupture et diminue avec l'augmentation de la porosité.
Sa valeur est très faible : 1 à 3 % pour les alliages, 10 % maximum pour les métaux purs.

Dureté

Caractéristique principale pour mesurer la résistance à l'usure (avec les essais normalisés, Rockwel en particulier, Vickers).
L'essai Rockwel permet de contrôler les pièces traitées et non traitées, de toutes densités.
L'essai Vickers s'effectue sur pièces traitées de densité élevée.

Résistance à la fatigue

Elle est d'un rapport de 40 % environ avec la résistance à la traction (pratiquement analogue aux métaux non frittés).

Précisions

Les précisions dimensionnelles et l'état de surface varient selon la gamme de fabrication.

Dimensions

On obtient les qualités : 13 à 10 aux cotes parallèles au sens de compression ; 9 à 7 avec calibrage des formes, aux cotes perpendiculaires au sens de compression, dont les trous ; 9 à 13 pour les entraxes.

État de surface

De 0,8 à 6,4 Ra en frittage simple et 0,4 à 0,8 Ra avec calibrage.

4.4 Conception des pièces frittées

Dimensions

Elles sont limitées aux capacités actuelles des machines. On admet :

Section. Limitée par la pression de compression (généralement de 4 à 6 tonnes/cm^2) ce qui nécessite des presses très puissantes.

Hauteur. Limitée par la hauteur de la matrice et la course de presse qui comprime la poudre et éjecte le comprimé ; on admet actuellement ≅ 50 mm maxi de hauteur pièce.

Le volume et le poids maxi de pièces à produire sont définis, connaissant la puissance-machine.

Formes

Elles sont à définir en considérant que la poudre, durant la compression, s'écrase sans s'écouler (fig. 10.67).

Pièces percées

Les trous et alésages seront lisses, sans gorge intérieure (fabrication impossible).

Conditions minimales conseillées :

Diamètre des trous 2 mm ; entraxe des trous 3 mm.

Distance aux parois d ⩾ h/10, avec d mini 2 mm et h = hauteur de la forme.

Fond de trou borgne à distance h_2 ⩾ h/5 de la face opposée, avec h_2 mini 2 mm.

Profondeur des lamages p ⩾ h/4, avec h = hauteur de la forme coaxiale et dépouille mini 7°.

Trous polygonaux sans angles vifs ; rayon de raccordement r ⩾ 0,5.

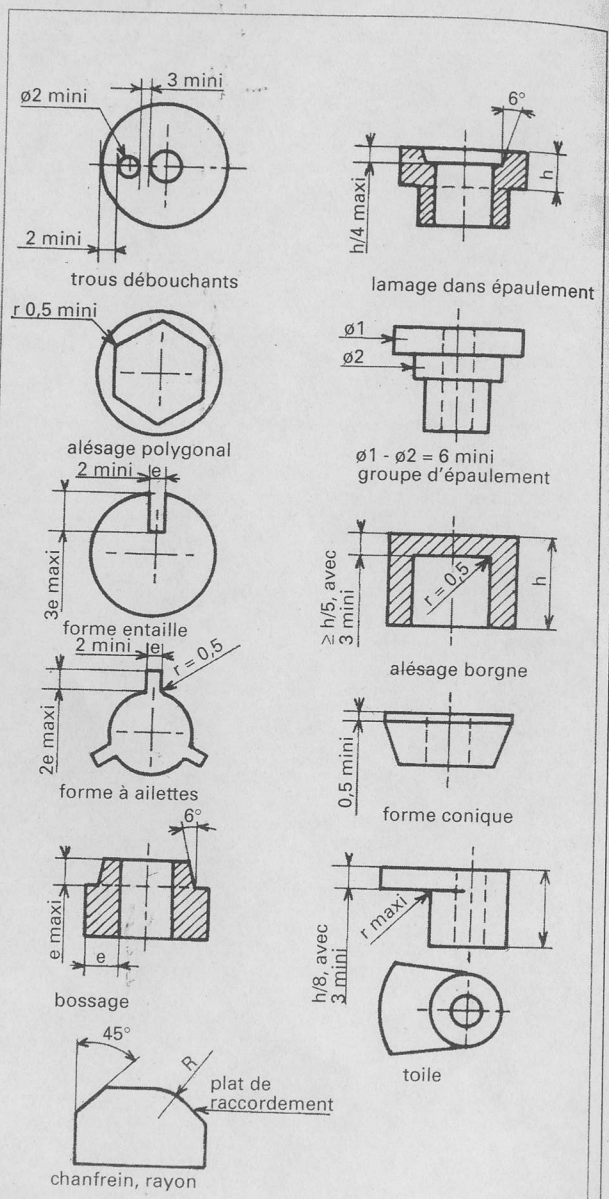


FIGURE 10.67 Conception de pièces à obtenir par compression des poudres.

Pièces épaulées

Limiter le nombre d'épaulements successifs, avec une différence ⩾ 3 mm entre parois : (différence des diamètres successifs ⩾ 6 mm).

Hauteur d'un bossage d ⩽ 1.2 e, avec e = épaisseur de la paroi de l'épaulement avec 2 mm mini et dépouille 7°.

Pièces avec une toile

Épaisseur de toile e ⩾ h/10, avec e mini 2 mm.

Situer la toile d'un côté du bossage et raccorder par un rayon r mini ⩾ 0,5 mm.

Pièces avec ailettes

Épaisseur des ailettes e ⩾ l/2, avec l = longueur ailettes et e mini 2 mm.

Pièces avec entailles, rainures

Largeur des entailles et rainures e ⩾ p/3, avec p = profondeur des entailles et e mini 2 mm.

Pièces coniques

Grand diamètre situé impérativement côté du poinçon supérieur et à terminer par un cylindre court ⩾ 0,5 mm.

Pièces plates

De préférence, remplacer les angles vifs par un chanfrein (à 45°) ou un arrondi (r ⩾ 0,5 mm) ; plans inclinés à terminer par un chanfrein ou de préférence un méplat de 0,1 mm mini.

4.5 Mise en œuvre

La fabrication des poudres comprimées s'effectue suivant différentes phases, en fonction des pièces à obtenir : produit semi-fini ; produit fini et d'utilisation spécifique (fig. 10.68).

Les principales phases sont : mélange, compression à froid et à chaud, frittage, calibrage à froid, forgeage à chaud, filage à chaud, extrusion ; et d'autres phases spécifiques (traitements thermiques, traitement de surface, usinage).

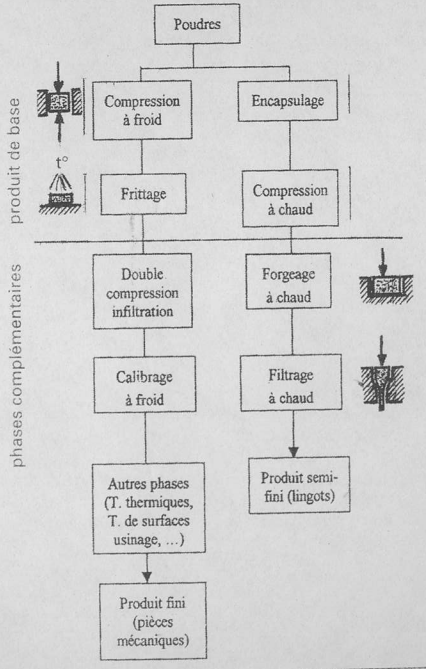


FIGURE 10.68
Différentes phases de production en compression des poudres.
(D'après revue *Sciences et techniques*)

Mélange

Association de différents matériaux avec un lubrifiant adapté.
Les alliages pour pièces mécaniques sont constitués de fer additionné de cuivre, de carbone, de nickel, de molybdène (normalisés NFA 95-712, etc.)
Le lubrifiant (cire micronisée, stéréate de zinc) évite le grippage dans le moule.

Compression

Formage du produit (densité à vert), en fonction de la compressibilité de la poudre et de conditions techniques (forme du moule et vitesse de montée en pression) sous une pression moyenne de 6 tonnes/cm^2 (700 à 800 MPa) lui donnant sa résistance à vert.
Pour obtenir une densification très homogène, l'outillage est à double effet (2 poussoirs opposés) (fig. 10.69).
L'éjection de la pièce s'effectue par le prolongement de la course du poinçon inférieur.

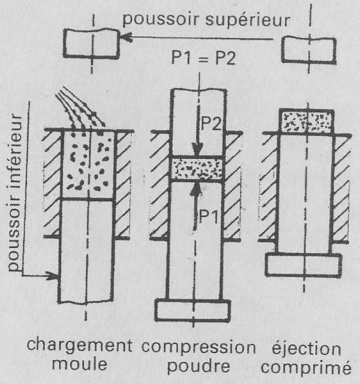


FIGURE 10.69
Schéma de principe de compression de poudre avec presse double effet.

Coefficient de remplissage de la matrice

Il est égal à la densité de la poudre comprimée/densité de la poudre non tassée (aciers ≅ 2,5).
On a la densité frittée df = (P− 0,01P)/(V + 0,003V), soit (P.0,987)/V, avec P = poids du comprimé ; V = volume du comprimé.

Double frittage

Certaines pièces subissent deux phases de frittage avec une phase de formage intermédiaire (calibrage) pour améliorer la précision et les caractéristiques du produit.

Préfrittage

Il s'effectue à température inférieure à celle du frittage : évite l'écrouissage et favorise l'augmentation de la masse volumique (densité ≅ 7,2).
Préfrittage et frittage permettent d'obtenir des pièces de grande résistance à la rupture (jusqu'à 85 daN/mm^2) avec un bon pourcentage d'allongement (fig. 10.70).

Calibrage

Opération analogue à la compression ; pour obtenir une grande précision dimensionnelle, avec accroissement de densification et de caractéristiques mécaniques (dureté superficielle...).

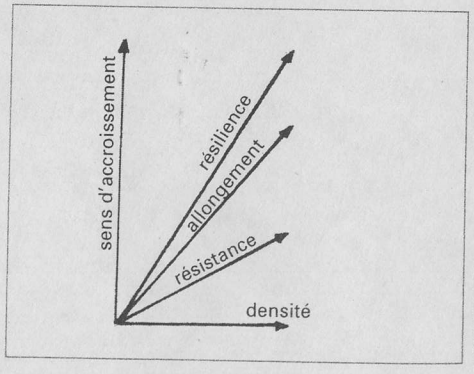


FIGURE 10.70 Schéma d'évolution des caractéristiques mécaniques des pièces frittées-forgées.

Forgeage

Obtention de pièces sans bavures avec : porosité éliminée, résilience, ductibilité et ténacité augmentées ; précision de poids.

Usinage

Réalisation de formes impossibles à obtenir par compression (perpendiculaires au sens des poinçons) ou des surfaces très précises (rectification).
Ébavurage éventuel pour éliminer de légères bavures issues d'un jeu dans l'outillage, par vibrations (shot penning).

Traitements thermiques

Éventuellement on effectue :
La trempe à cœur, par induction, à haute fréquence, par oxydation. Elle ne doit pas s'effectuer en bain de sel (inclusion dans les pores).
La cémentation gazeuse, la carbonitruration.
Le revenu pour pièces fragiles améliorant la résistance à l'usure.

Traitement de surface

Par dépôt électrolytique, pour protection contre la corrosion (couche de zinc et cadmium) avec effet décoratif (couche de chrome et nickel).
Application sur des pièces denses, pour éviter la pénétration d'électrolyte dans les pores (en obstruant les pores, avec une préparation de résines époxydes...).

Poudres d'aluminium et ses alliages

Compression

Elle s'effectue sous faible effort.
Le coefficient de remplissage est de 1,5 à 1,9 ; la densité à vert après compression de 2,3 à 2,6 (bonne rigidité pour la manipulation des pièces).
La résistance à la traction (de 25 à 70 daN/mm^2) croît avec la pression de compression et selon les phases de fabrication (fig. 10.66).

Frittage

Il s'effectue sous différentes atmosphères de chauffe (azote, vide, air, ammoniac cracké en particulier) à une température de 600 à 650 °C, selon les poudres.
La chauffe est rapide (bonne conductibilité thermique, et le refroidissement s'effectue à l'air ou à l'eau).

Calibrage

Il s'effectue à froid, sous 2,5 à 5 tonnes.

Forgeage

Il s'effectue à chaud, de 200 à 400 °C selon le matériau (améliore les caractéristiques mécaniques).

Traitements thermiques

Appliqués aux pièces frittées : trempe et maturation, trempe et revenu.

4.6 Outillage

Il est à double poinçon ou à poinçons multiples, selon le type de pièces à produire.

Outillage à double poinçon

La matrice est maintenue sur une semelle, par frettage, ce qui lui donne une précontrainte nécessaire pour les efforts appliqués en production de grande série (fig. 10.71).
Elle est en acier rapide, acier inoxydable, carbure (grande série).
La semelle, en acier 35 NC 16 généralement.
Les poinçons sont du même matériau que la matrice.
Le poinçon supérieur a une longueur suffisante pour assurer l'éjection du comprimé.
Les éléments mobiles (poinçons, broche) ajustés glissant juste, sont à lubrifier au graphite pour éviter la souillure de la poudre à comprimer.

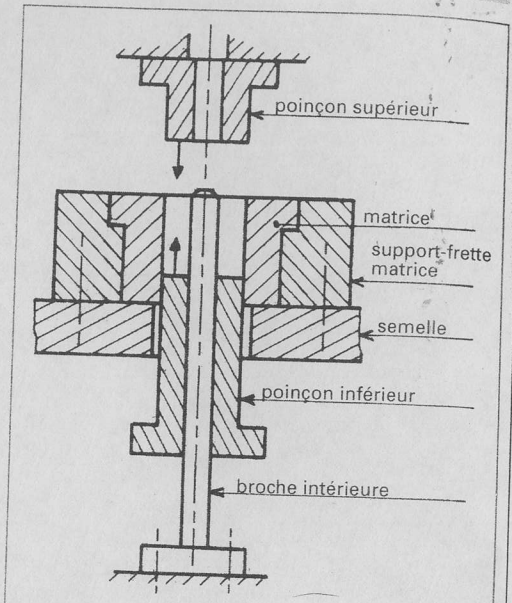


FIGURE 10.71
Schéma d'outillage double poinçon de moulage par compression des poudres.

Pièces obtenues, avec outillage à double poinçon

Elles sont généralement de section constante ou conique, soit :
Longues pleines, d'une longueur maximale égale à 5 diamètres de la pièce.
Longues creuses, d'une longueur maximale de 20 épaisseurs de paroi (épaisseur de paroi supérieure à 1 mm).
Plates, avec une épaisseur minimale de 2 mm et des profils quelconques. Ces différents types de pièces sont réalisables avec un ou plusieurs trous.

Outillage à poinçons multiples

Pour la production de pièces comportant plusieurs épaisseurs (fig. 10.72).
Pour obtenir la densification homogène, la quantité de poudre doit être répartie avant compression, ce qui nécessite un poinçon inférieur spécifique.
Poinçon inférieur. Modulaire, avec des hauteurs différentes réglées pour la compression à obtenir, en fonction du coefficient de remplissage (acier = 2,5).
Pour la production de certaines pièces, des poinçons supérieurs multiples peuvent être nécessaires.

Pièces obtenues avec outillage à poinçons multiples

Elles sont généralement de type prismatique à épaulement, avec des profils de forme en L, T, Z, U, quelconque (fig. 10.73).

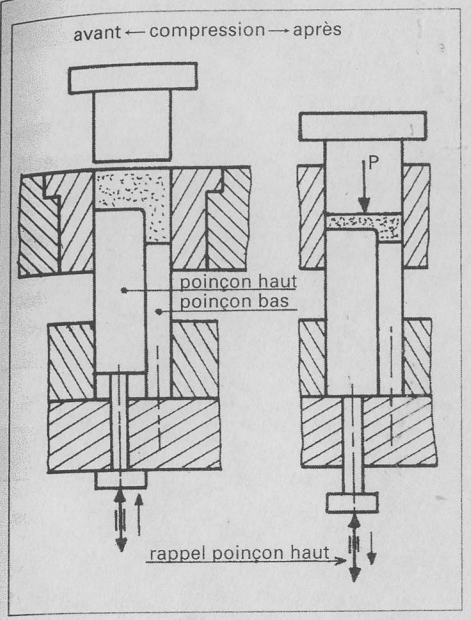


FIGURE 10.72 Schéma d'outillage multipoinçons pour moulage pièces à plusieurs épaisseurs.

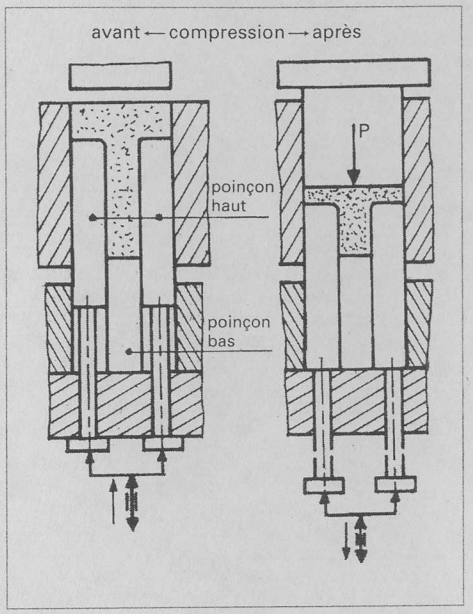


FIGURE 10.73 Schéma d'outillage multipoinçons de pièces en T avec épaulement long.

Pièces frittées de section non continue

Elles sont réalisables à l'aide d'une matrice mobile transversalement, permettant l'éjection sur presse spécifique (système OLIVETTI) (fig. 10.74).

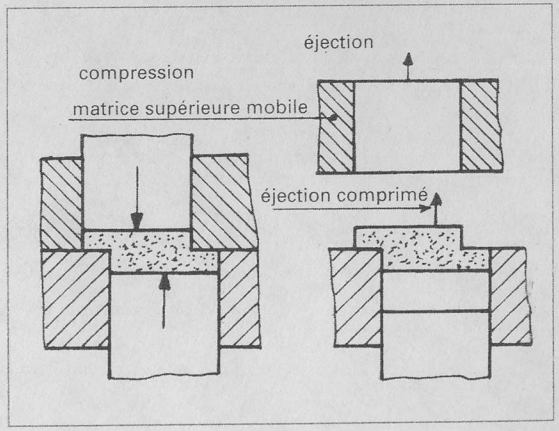


FIGURE 10.74
Matrice avec élément mobile transversalement pour pièces à section non continue.

4.7 Machines

Utilisation des presses et des fours de chauffe.

Phases de compression et de calibrage

Utilisation de presses mécaniques ou hydrauliques, puissance 1 000 tonnes, conçues spécifiquement (éjection de la pièce, après compression).

Phase de frittage

Utilisation de fours à atmosphère de protection, par un gaz qui doit être réducteur et le plus sec possible : (point de rosé maxi de + 2°). Éventuellement, fours sous vide, pour la production d'aciers à haute résistance.

4.8 Pièces obtenues

Elles sont saines et utilisables directement, de conceptions très différentes et bien spécifiques. Produites en grande série, leur coût est faible.
Les pièces en poudre d'aluminium sont de petites dimensions (coût des poudres) des types : cylindrique (pistons d'amortisseurs, pignons...), plat (leviers, bielles...), divers, avec insert métallique éventuel.
Les pièces en poudre d'acier sont de types divers : cylindriques, plates, de forme quelconque, de petites dimensions en général.

Pièces de type cylindrique

(bagues, cylindre, arbres...) en fer, acier au carbone, alliages fer-cuivre, fer-cuivre-nickel, bronze, laiton...

Pièces autolubrifiantes

Coussinets en alliage ferreux, bronze, (en particulier) avec 20 à 30 % de porosité remplie de lubrifiant par imprégnation ou sous vide (d'huile, de Téflon).

Pièces de frottement

Patins à faible ou fort coefficient de frottement.

À faible coefficient de frottement

En bronze, après frittage, application d'une couche de graisse au bisulfure de molybdène et laminage imprégnant la graisse dans les pores.

À fort coefficient de frottement

La poudre comprenant des métaux et des produits abrasifs est fixée sur un support (tôle d'acier) par frittage sous-pression.
Les pièces obtenues sont : plaquettes de frein, d'embrayage, patins de guidage de mobiles (glissières de machines...).

Pièces de filtrage

Avec porosité de 30 à 50 % selon les matériaux utilisés. On utilise le bronze (en poudre sphérique, frittée directement sous compression), l'acier inoxydable (résistance à la corrosion, aux acides et aux composés de chlore humide) (fig. 10.75).

Matériaux	Densité	Porosité	Produits
Bronze	4,5 à 5,5	40 à 50 %	Tubulaires et bandes
Inoxydables	4,6 à 5,6	30 à 45 %	Tubulaires et bandes
Nickel	4 à 5	45 %	Tubulaires
Titane	2,8 à 3,3	27 à 38 %	Tubulaires et bandes

FIGURE 10.75
Matériaux utilisés en fabrication par compression des poudres pour éléments filtrants.

Elles sont de type tubulaire (cylindrique, conique) en bandes découpables aux formes désirées, pour filtration de liquides et de gaz (sous toutes pressions et toutes températures), soit : séparation de liquide dans un gaz ; diffusion de gaz (gazéification ou échappement) ; effet capillaire (pare-flamme, régulation...) fluidification (manutention de poudres ; plastification de pièces métalliques).

Pièces diverses

Contacts électriques en matériaux conducteurs (tungstène-argent, tungstène-cuivre) ; pièces réfractaires, à base de tungstène et de titane ; pièces en carbure de bore, pour énergie nucléaire ; pièces magnétiques, doux ou durs selon la constitution, à base de fer, fer-nickel, pour masses polaires, noyaux...

Produits bruts

En petits lingots de super-alliages (acier rapide, céramiques...) obtenus par compression isostatique à froid ou à chaud, encapsulage.

11 PROCÉDÉS DE PERÇAGE

1. Différents procédés de perçage 361
2. Perçage par outil de coupe 361
   - 2.1 Généralités 361
   - 2.2 Forets à queue cylindrique 364
   - 2.3 Forets à queue conique 365
   - 2.4 Définition géométrique 366
   - 2.5 Vitesse d'avance 367
   - 2.6 Vitesse de coupe 368
   - 2.7 Puissance nécessaire à la coupe PW 369
   - 2.8 Mise en œuvre des perçages 369
   - 2.9 Centrage des trous en bout d'arbre 370
   - 2.10 Pointage des trous à positionnement précis 372
   - 2.11 Perçage des trous de taraudage 373
   - 2.12 Chambrage des logements des têtes de vis 374
   - 2.13 Ébavurage des trous 376
   - 2.14 Perçage des trous à diamètre relativement grand 378
   - 2.15 Perçage des trous longs 379
   - 2.16 Cycles des perçages 380
   - 2.17 Mouvements de génération 381
   - 2.18 Appareillages porte-outils 382
   - 2.19 Machines de perçage 383
3. Procédés de perçage par érosion 384
   - 3.1 Procédés de perçage au laser 384
   - 3.2 Procédés de perçage par ultrasons 386

1. Différents procédés de perçage

Réalisation de trous en pleine matière avec plus ou moins de précision, à choisir en fonction des conditions technologiques.

Perçage par outil de coupe

Systématiquement utilisé en usinage de l'ensemble des pièces mécaniques réalisées sur machines-outils à outils coupants (tours, fraiseuses, perceuses...).

Poinçonnage

Obtention de trous dans les métaux en feuilles (tôles) en travaux de grande série, avec une bonne précision diamétrale (qualité 9 à 7). Voir chapitre « Procédés de découpe ».

Perçage au laser

Obtention de trous de très petit diamètre, à très grande vitesse (grande série) dans tous matériaux, éventuellement avec peu d'accessibilité.

Perçage par ultrasons

Obtention de trous de très petit diamètre, sans contrainte d'usinage dans des matériaux très durs et cassants.

Perçage au jet d'eau

Obtention de trous de diamètre peu précis, dans tous matériaux. Voir chapitre « Procédés de découpe ».

Perçage au jet plasma

Obtention de trous de diamètre peu précis, dans des matériaux réfractaires. Voir chapitre « Procédés de découpe ».

Nota : les opérations de perçage des pièces mécaniques, de type prismatique, comprennent environ 40 % du temps d'usinage sur les machines à commande numérique.

2. Perçage par outil de coupe

2.1 Généralités

Obtention, en pleine matière, des formes cylindriques d'intérieur – les trous – à l'aide d'outils rotatifs de forme – les forets – en une seule passe, pour des diamètres de quelques dixièmes de mm à 100 mm (fig. 11.1).

Ce procédé s'effectue sur toute machine d'usinage par coupe (perceuses, fraiseuses, tours, centres d'usinage et de tournage).
Le mouvement de coupe, circulaire, est donné à l'outil ou à la pièce, selon les machines employées.

Précisions obtenues

Diamétrale. Elle varie généralement de H11 à H9, selon les conditions technologiques (outil, lubrification, matériau travaillé).
État de surface. Il varie entre 3,2 et 1,6 Ra.
Nota. Avec les outils très rigides en carbure, la qualité H8 et l'état de surface 0,8 Ra peuvent être obtenus.

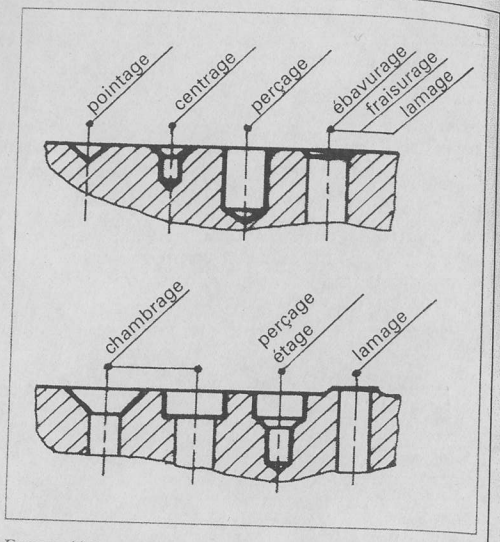


FIGURE 11.1
Différentes opérations de perçage.

Conception des forets

Les forets ont généralement deux arêtes de coupe avec deux goujures assurant l'écoulement des copeaux et constituant les angles de coupe des outils monoblocs (acier rapide et carbure).
Ils sont monoblocs ou à plaquettes en carbure rapportées (fig. 11.2).
Forets de petit diamètre. Jusqu'au diamètre 12, en général, ils sont monoblocs, en acier rapide ou en carbure.
Au-delà du diamètre 10, ils peuvent être monoblocs (en acier rapide) ou à plaquettes carbure rapportées (brasées ou indexées).
Mise en position et maintien. Effectués par la queue d'outil : cylindrique pour les diamètres jusqu'à 20 en général ; conique, au cône Morse, CM1 à CM6 selon les diamètres ; cylindrique avec tenon d'entraînement (fig. 11.2 et 11.3).

Goujures

Elles peuvent être à hélice « normale » (30°) pour aciers et fontes en particulier ; à hélice longue (15°) favorisant l'écoulement des copeaux fragmentés (matériaux durs, laitons, bronze...) ; à hélice courte (40°) pour copeaux continus (aluminium et ses alliages, cuivre...) donnant un plus grand angle de coupe ; droites pour des outils carbure.

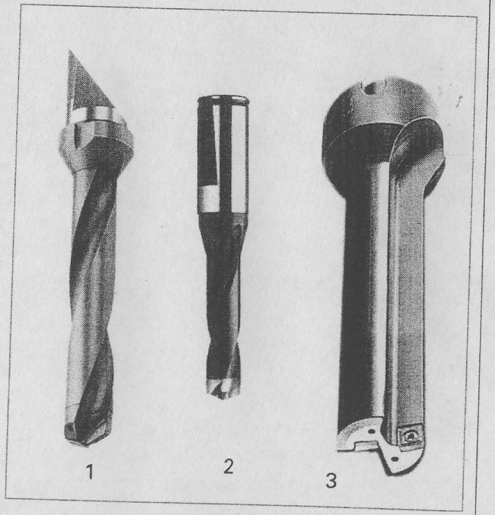


FIGURE 11.2
Différents forets en carbure..

1. Embout brasé affutable *(Doc. Sandvik Coromant)*
2. Embout interchangeable, goujure hélicoïdale *(Doc. Seco)*
3. Embout à plaquettes indexables, goujures droites *(Doc. Novex)*

Pointe des forets monoblocs

Par conception ou affûtage, elle peut être amincie : la coupe s'effectuant jusqu'au voisinage du centre, la puissance nécessaire est diminuée et la vitesse d'avance peut être augmentée.
Pointe amincie. La surcoupe est diminuée, elle varie de 0,02 à 0,08 mm (H8-H9) selon les diamètres ; le foret se centre à l'attaque ; le pointage ou le canon de guidage pourront être évités en perçage de trous à positionnement non rigoureux.

Affûtage

Selon les matériaux usinés, l'affûtage des forets diffère, soit (fig.11.4) :
– Pointe non modifiée, pour aciers, métaux non ferreux et plastiques.
– Pointe réduite par amincissement de l'âme, pour tous perçages avec forets de grands diamètres.
– Pointe coupante (affûtage trois pans ou similaires) pour perçages de précision et sous forte avance.
– Réduction angle de coupe, pour matériaux durs (aciers au manganèse, alliages réfractaires,...) ou cassants (bronze...).
– Affûtage deux pans, sur forets à âme épaisse, pour matériaux très durs.
– Arêtes de coupe brisées, pour fonte malléable.

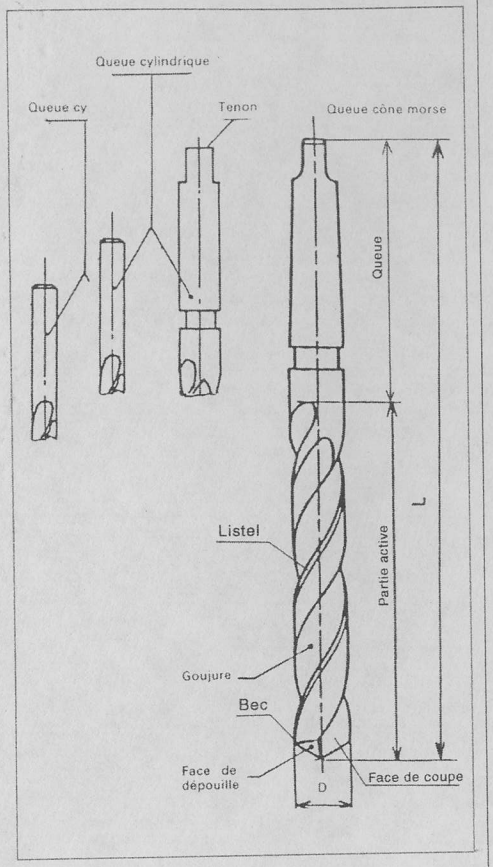


FIGURE 11.3 Foret hélicoïdal monobloc.
Doc. Leclerc

Nota : Bec des forets à plaquettes carbure, avec un chanfrein bε, contribue à une augmentation de la durée de vie de ces forets.

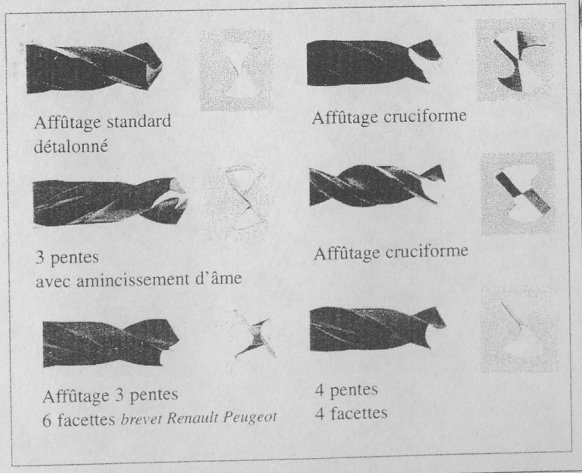


FIGURE 11.4
Différents affûtages des forets hélicoïdaux monoblocs.
Doc. Avyac

2.2 Forets à queue cylindrique

Ils sont normalisés suivant plusieurs séries (fig.11.5).

Série extra courte

(NF E 66-0610, DIN 1897). Hélice à droite (30° pour ARS et 25° pour carbure) généralement dans les diamètres 0,4 à 18 mm par paliers de 0,1 à 1 mm, avec longueur de goujures de 6 à 60 mm, selon les diamètres.

Série courte

(NF E 66-067, DIN 338). Hélice à droite de 30° généralement dans les diamètres de 0,3 à 20 mm par paliers de 0,05 à 0,5 mm, avec longueurs de goujures de 3 à 140 mm, selon les diamètres.
Cette série, qui est la série normale, comprend des forets spécifiques, tels que :

Hélice à gauche, de 30°

Coupe à gauche, pour le décolletage, généralement dans les diamètres 1 à 12 mm avec longueurs d'hélice de 12 à 100 mm, par paliers de 0,2 à 0,5 mm.

Hélice à droite de 15°

Pour les laitons, généralement dans les diamètres de 1 à 12 mm, avec longueurs d'hélice de 12 à 100 mm par paliers de 0,2 à 0,5 mm.

Hélice à droite de 40°

Coupe à droite, pour alliages d'aluminium, généralement dans les diamètres 1 à 12 mm, par paliers de 0,1 à 0,5 mm avec longueurs d'hélice de 12 à 100 mm.

Nota : À percussion avec rotation.

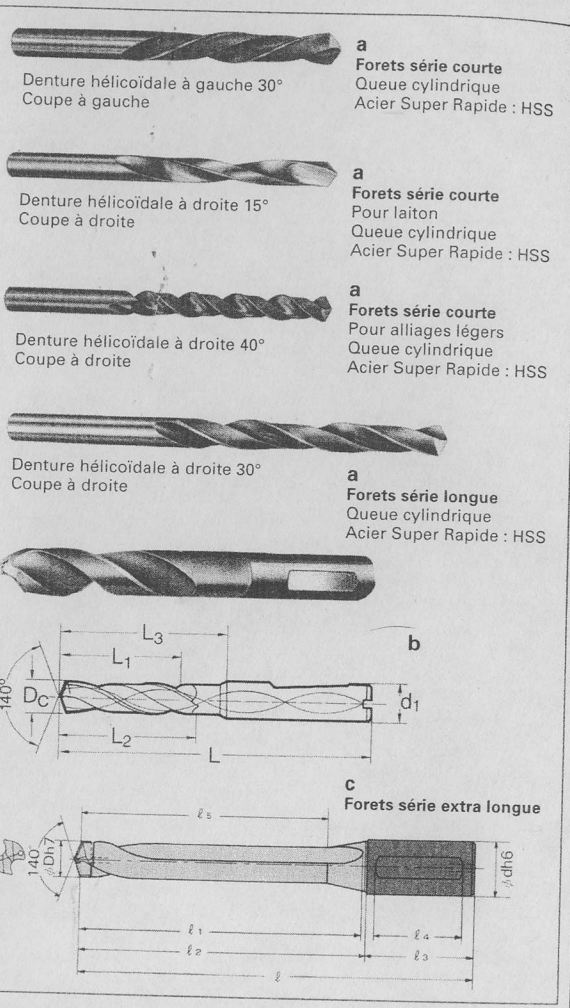


FIGURE 11.5 Forets à queue cylindrique.
a – Forets monoblocs en acier rapide *(Doc. Leclerc)*
b – Forets mini-standard en carbure revêtu et trous de lubrification *(Doc. Novex)*
c – Foret à embout carbure, goujures mixtes, trous de lubrification *(Doc. Sumitomo-Electric)*

Pour matériau de génie civil, hélice à 28° et coupe à droite, dans les diamètres 3 à 13 mm par paliers de 0,5 à 1 mm et longueurs d'hélice de 30 à 90 mm, avec plaquette brasée en carbure nuance « bâtiment ».

Série longue

(NF E 66 068). Généralement dans les diamètres 1 à 30 mm, par paliers de 0,1 à 2 mm, avec longueurs des goujures de 33 à 200 mm.
Usinage des alliages d'aluminium. Les diamètres sont limités à 12 mm en général, par paliers de 0,2 à 0,5 mm avec longueurs de goujures de 30 à 130 mm.

Série extra-longue

(NF E 66-075). Généralement dans les diamètres de 3 à 12 mm avec longueurs de goujures de 120 à 300 mm.

2.3 Forets à queue conique

Ils sont normalisés suivant plusieurs séries, avec queues aux cônes Morse de CM1 à CM6, en fonction des diamètres, soit : (fig.11.6).

Série courte, dite normale

(NF E 66-071), Hélice à droite 30°, généralement de diamètres : 6 à 14 mm avec queue CM1 ; 14,25 à 23 mm avec queue CM2 ; 23,25 à 31,75 mm avec queue CM3 ; 32 à 50 mm avec queue CM4 ; 51 à 75 mm avec queue CM5 ; 80 à 100 mm avec queue CM6 ; par paliers de 0,5 à 5 mm et goujures de 57 à 300 mm, selon les diamètres.
Usinage des alliages d'aluminium : hélice à 40°, de diamètre 10 à 30 mm généralement, avec goujures de 87 à 175 mm selon les diamètres.

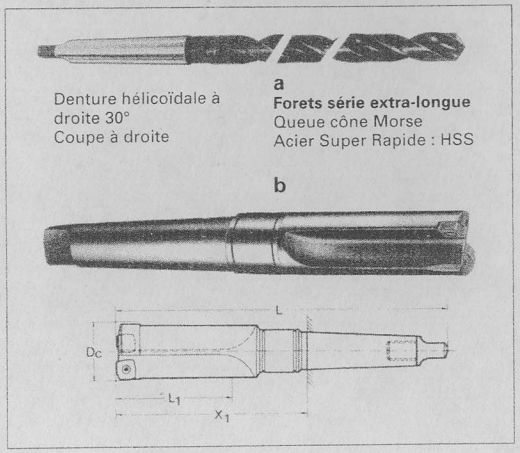


FIGURE 11.6 Forets à queue cônique.
a – Forets monoblocs en acier rapide supérieur *(Doc. Leclerc)*
b – Forets à plaquettes carbure rapportées et trous de lubrification *(Doc. Novex)*

Série longue

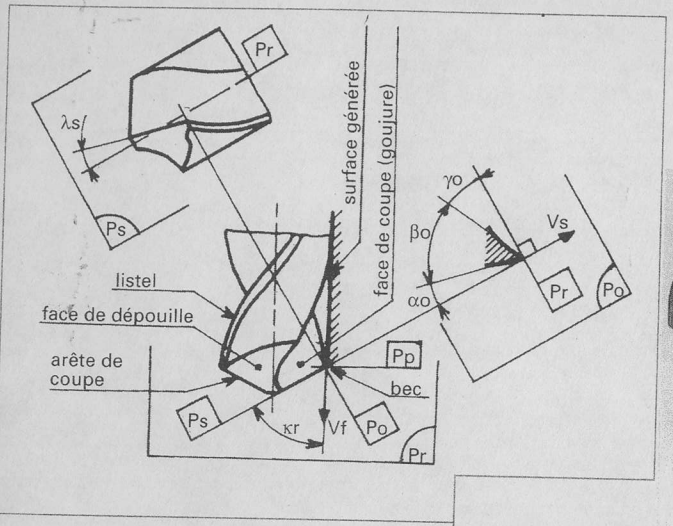
(NF E 66-070). Généralement de diamètres 5 à 14 mm avec CM1 ; 15 à 22 mm avec CM2 ; 24 à 30 mm avec CM3 ; 32 à 50 mm avec CM4.

Série extra-longue

(NF E 66-076). Généralement de diamètres : 6 à 11,5 mm avec CM1 ; 12 à 23 mm avec CM2 ; 24 à 30 mm avec CM3 ; avec des longueurs taillées de 120 à 275 mm (fig. 11.6).

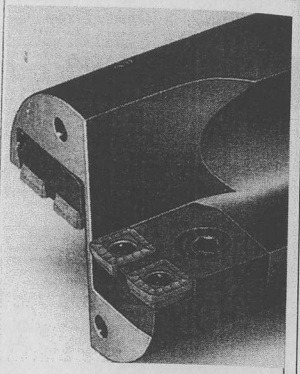
2.4 Définition géométrique

(NF E 66-502) On considère pour chaque partie active, qui comprend une arête de coupe principale, les angles de l'utilisateur, outil en main, avec les directions de coupe et d'avance supposées orthogonales (fig.11.7).



a – Foret hélicoïdal

b – Foret à plaquettes carbure indexées *(Doc. Novex)*



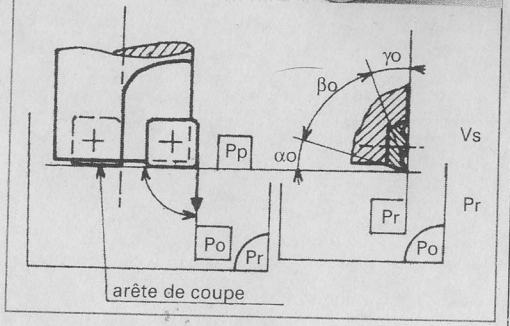


FIGURE 11.7 Définition géométrique des forets (angles de l'utilisateur).

Face de coupe, constituée par la goujure sur laquelle s'évacue le copeau.
Face de dépouille, au regard de la surface travaillée.
Arête de coupe principale, intersection des faces de coupe et de dépouille.
Elle peut être en cuillère ou avec brise-copeaux pour plaquettes en carbure.
Arête de pointe (ou centrale) intersection des faces de dépouille des forets monoblocs.
Angle de pointe ou au sommet δr (delta r), formé par les deux arêtes de coupe, dans le plan Pr.
La pointe peut être conçue ou affûtée de différentes formes pour obtenir : optimisation avance, effort de poussée réduit, non-déviation à l'attaque.
Plan de référence Pr qui passe par l'axe du corps d'outil.
Angle de direction d'arête κ_r (kappa r) formé par le plan d'arête Ps et le plan de travail Pf, dans le plan de référence Pr.
Angle de coupe orthogonal γo (gamma o) formé par la face de coupe et le plan de référence Pr, dans le plan orthogonal Po.

Angle de dépouille orthogonal αo (alpha o) formé par la face de dépouille et le plan d'arête Ps, dans le plan orthogonal Po.
Angle de taillant βo (bêta o) de valeur 90°- (γo + αo).
Angle d'inclinaison d'arête λs (lambda s) formé par l'arête de coupe principale et le plan de référence Pr, dans le plan d'arête Ps.
Bec, intersection de l'arête de coupe principale avec le listel : généralement à angle vif ; éventuellement avec biseau bε (b epsilon) (accroît la durée de vie d'outil : forets de gros diamètre ou à plaquettes carbure).

2.5 Vitesse d'avance

Elles varient selon les matériaux, outil et pièce à usiner et suivant des plages de diamètre des forets. Elle est d'autant plus grande que le diamètre du foret est grand (résistance aux efforts de coupe et de poussée).
Les fortes avances conviennent à la coupe sous lubrification.

Avances par tour f_z

0,02 à 0,80 mm/tr pour les forets en acier rapide (fig. 11.8).
0,01 à 0,80 mm/tr pour les forets en carbure, monobloc et à embout brasé (fig. 11.9).
0,05 à 0,30 mm/tr pour les forets à plaquettes ou embout carbure indexés (fig. 11.10).

Forte avance

S'assurer que l'outil ne talonne pas.
Outils monoblocs. L'angle de dépouille sera relativement grand : évite le talonnage au voisinage du centre de l'outil.
Outils de grand diamètre, à plaquettes carbure indexées. Les dépouilles seront différentes entre les plaquettes (plus grandes sur celles situées en position diamétrale extrême).

Matières à usiner	Vitesses de coupe m/mn	Avances en mm par tour suivant diamètres Ø 2 à 8	Ø 10 à 20	Ø 20 à 30	Ø 30 à 40	Lubrifiants	Type foret
Aciers jusqu'à 50 daN/mm²	30 à 40	0,03 à 0,1	0,12 à 0,23	0,3 à 0,4	0,5 à 0,8	Huile soluble	A
Aciers de 50 à 70 daN/mm²	20 à 30	0,03 à 0,1	0,12 à 0,2	0,25 à 0,35	0,4 à 0,7	Huile soluble	A
Aciers de 70 à 90 daN/mm²	15 à 25	0,03 à 0,08	0,1 à 0,18	0,2 à 0,3	0,3 à 0,4	Huile soluble	A
Aciers de plus de 90 daN/mm²	8 à 15	0,02 à 0,07	0,08 à 0,15	0,18 à 0,25	0,3 à 0,4	Huile soluble	D, E
Aciers inox bonne usinabilité	8 à 12	0,02 à 0,06	0,08 à 0,12	0,14 à 0,22	0,25 à 0,3	Huile soluble	D
Inox mauv. usin. et réfractaires	5 à 8	0,02 à 0,06	0,08 à 0,12	0,14 à 0,22	0,25 à 0,3	Huile soluble	E
Fonte malléable < 160 HB	15 à 25	0,03 à 0,12	0,12 à 0,3	0,35 à 0,5	0,5 à 0,6	A sec	A
Fonte dure >200 HB	5 à 15	0,03 à 0,08	0,1 à 0,18	0,2 à 0,3	0,35 à 0,5	A sec	D
Laiton sec jusqu'à 58 % Cu	63 à 80	0,06 à 0,25	0,3 à 0,4	0,5 à 0,63	0,7 à 1	Huile soluble - A sec	C
Laiton gras au-dessus de 59 % Cu	30 à 63	0,05 à 0,25	0,15 à 0,3	0,4 à 0,5	0,6 à 0,8	Huile soluble - A sec	C - A
Bronze	25 à 50	0,04 à 0,12	0,15 à 0,25	0,35 à 0,5	0,5 à 0,7	Huile soluble	C
Cuivre rouge	30 à 63	0,04 à 0,12	0,15 à 0,25	0,35 à 0,5	0,5 à 0,7	Huile soluble	B
Cuivre électrolytique	20 à 35	0,04 à 0,12	0,15 à 0,25	0,35 à 0,5	0,5 à 0,7	Huile soluble	A
Alliages légers	40 à 60	0,04 à 0,12	0,15 à 0,25	0,35 à 0,5	0,5 à 0,7	Huile soluble - A sec - Pétrole	B
Matières plastiques tendres	15 à 30	0,02 à 0,07	0,1 à 0,18	0,23 à 0,32	0,4 à 0,6	A sec - Air comprimé	B
Matières plastiques dures	10 à 25	0,03 à 0,08	0,1 à 0,2	0,25 à 0,35	0,4 à 0,6	A sec - Air comprimé	C

FIGURE 11.8 Vitesses de coupe et d'avance préconisées en perçage avec forets en acier rapide. *Doc. Leclerc*

Matières à usiner	Vitesses de coupe m/mn	Avances en mm par tour suivant diamètres jusqu'à Ø 8	Ø 10 à 20	Ø 25 à 40	Ø 50 et plus	Lubrifiants
iers jusqu'à 70 daN/mm²	30 à 40	0,03 à 0,04	0,04 à 0,06	0,06 à 0,08	0,08 à 0,15	Huile de coupe - Huile soluble
iers de 70 à 100 daN/mm²	40 à 70	0,03 à 0,04	0,04 à 0,05	0,06 à 0,07	0,07 à 0,1	Huile de coupe - Huile soluble
iers de 100 à 130 daN/mm²	30 à 40	0,02 à 0,03	0,03 à 0,04	0,04 à 0,05	0,06 à 0,08	Huile de coupe - Huile soluble
iers de plus de 140 daN/mm²	15 à 25	0,02 à 0,03	0,03 à 0,04	0,04 à 0,05	0,05 à 0,06	Huile de coupe - Huile soluble
iers inoxydables < 100 daN/mm²	30 à 45	0,02 à 0,03	0,03 à 0,04	0,04 à 0,06	0,06 à 0,08	Huile de coupe - Huile soluble
iers inoxydables >100 daN/mm²	15 à 25	0,02 à 0,03	0,03 à 0,04	0,04 à 0,05	0,05 à 0,06	Huile de coupe - Huile soluble
iers au manganèse 14 %	5 à 15	0,01 à 0,02	0,02 à 0,03	0,03 à 0,04	0,04 à 0,05	A sec
te malléable < 160 HB	30 à 70	0,03 à 0,04	0,05 à 0,06	0,08 à 0,1	0,15 à 0,2	A sec
te dure de 180 à 250 HB	50 à 80	0,03 à 0,04	0,04 à 0,05	0,06 à 0,08	0,08 à 0,12	A sec
te de 300 à 350 HB	10 à 15	0,02 à 0,03	0,03 à 0,04	0,05 à 0,07	0,08 à 0,10	A sec
re - Laitons - Bronze	60 à 110	0,04 à 0,05	0,06 à 0,08	0,08 à 0,1	0,1 à 0,15	A sec - Huile soluble
ges légers	50 à 130	0,04 à 0,06	0,08 à 0,12	0,15 à 0,2	0,25 à 0,3	A sec
xy	40 à 100	0,04 à 0,05	0,06 à 0,08	0,10 à 0,15	0,15 à 0,2	A sec
lite - Plastiques durs - Verre	15 à 30	0,03 à 0,04	0,03 à 0,04	0,05 à 0,06	0,07 à 0,08	A sec - Air comprimé
celaine	5 à 12	0,006 à 0,01	0,01	0,01	0,01	A sec

FIGURE 11.9 Vitesses de coupe et d'avance préconisées en perçage avec forets en carbure monobloc. *Doc. Leclerc*

aleurs indicatives pour l'application des forets SE-Drill

r. us.*	Matières	Résistance	Exemples	Vitesse de coupe v_c en m/min	Avance par tour f en mm pour ø de trou. 3	5	8	12	16	20
	Aciers non-alliés (C < 0,2%)	500 N/mm²	St37; C15	120	0,06–0,12	0,10–0,18	0,14–0,30	0,20–0,40	0,25–0,50	0,25–0,60
	Aciers non-alliés (C 0,2–0,3%)	600 N/mm²	St42; GS45	100	0,07–0,14	0,12–0,20	0,14–0,30	0,20–0,40	0,25–0,50	0,25–0,60
	Aciers non-alliés (C 0,3–0,4%)	700 N/mm²	St50; C35; GS52	80	0,07–0,14	0,12–0,25	0,16–0,35	0,25–0,45	0,30–0,60	0,35–0,60
	Aciers alliés	650 N/mm²	16MnCr5							
	Aciers non-alliés (C 0,4–0,5%)	800 N/mm²	St70; C45; GS60	70	0,07–0,14	0,12–0,25	0,16–0,35	0,25–0,45	0,30–0,60	0,35–0,60
	Aciers alliés	700 N/mm²	34CrMo4							
		800 N/mm²	42CrMo4; 50CrV4	60	0,06–0,12	0,10–0,18	0,14–0,25	0,16–0,35	0,20–0,45	0,25–0,50
	Aciers alliés	900 N/mm²	32CrMo12; 50CrNi13; C60	50	0,06–0,12	0,10–0,18	0,14–0,25	0,16–0,35	0,20–0,40	0,25–0,45
		1000 N/mm²	100Cr6; 90MnCrV8	40	0,05–0,10	0,08–0,15	0,12–0,20	0,14–0,25	0,16–0,35	0,20–0,40
		> 1000 N/mm²	X210Cr12; 34CrAlNi7	30–40	0,05–0,10	0,08–0,15	0,12–0,20	0,14–0,25	0,16–0,30	0,20–0,35
		150–200 HB	GG20; GGG40; GTS45	80	0,10–0,20	0,20–0,50	0,30–0,60	0,40–0,70	0,40–0,80	0,40–0,90
	Fonte	200–220 HB	GG30; GGG50; GTS55	60	0,10–0,20	0,20–0,45	0,30–0,50	0,40–0,60	0,40–0,70	0,40–0,80
	GG, GGG, GTS	220–250 HB	GG40; GGG60; GTS65	50	0,08–0,18	0,16–0,40	0,25–0,45	0,30–0,50	0,30–0,60	0,30–0,70
		250–320 HB	GGG70; GTS70	40	0,07–0,18	0,14–0,30	0,20–0,40	0,25–0,40	0,30–0,50	0,30–0,60

IGURE 11.10 Vitesses de coupe et d'avance préconisées en perçage avec forets en carbure (monobloc, embout, plaquettes)

2.6 Vitesse de coupe

lles sont définies en fonction des matériaux à usiner et des outils, pour des profondeurs de erçage : 2 D avec forets carbure ; débourrage tous les 2 D avec forets en acier rapide.

Profondeur maximale de perçage

vec foret en carbure : de 3 à 4 D, sous une bonne évacuation des copeaux ; de 6 D sous lubrication forcée (par l'outil).

Facteur de correction de la vitesse de coupe

2 D pour les perçages de profondeur inférieure à 2 D ; 0,8 D pour des profondeurs supéeures à 2 D.

Plage des vitesses de coupe

Elles varient selon les matériaux, de :
5 à 80 m/min pour forets en acier rapide (fig. 11.8).
5 à 150 m/min pour forets à embout carbure brasé et carbures monoblocs (fig. 11.9).
30 à 400 m/min pour forets à plaquettes ou embout carbure indexés (fig. 11.10).
Arrosage : Nécessaire à grand débit pour assurer la coupe sans détérioration rapide de l'outil.

2.7 Puissance nécessaire à la coupe P_W

À déterminer en considérant l'effort tangentiel de coupe F_c (fig. 11.11).
Puissance utile de perçage

$$P_u = f.\ D.\ Ka.\ V / 180 \cdot \eta,$$

avec :
- f = avance par tour en mm
- D = diamètre du foret en mm
- Ka = pression spécifique de coupe, en N/mm²
- V = vitesse de coupe en m/min
- η = rendement de la machine.

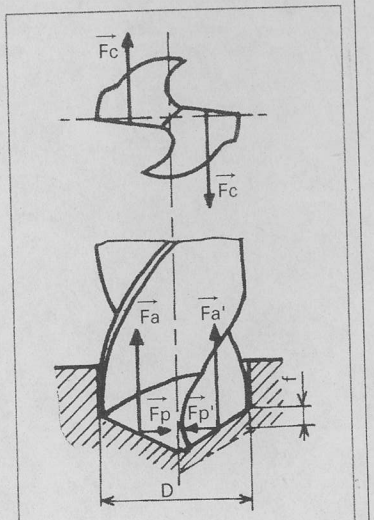


FIGURE 11.11
Efforts de coupe en perçage (pleine matière).

2.8 Mise en œuvre des perçages

Forets hélicoïdaux monoblocs en acier rapide

Usinage de la plupart des matériaux, à tous diamètres avec vitesse de coupe adaptée.
Matériaux difficilement usinables. Utiliser des forets en acier rapide additionné de cobalt (≅ 5%).
Amélioration de l'état de surface des trous. Utiliser des forets en acier rapide revêtu TIN (1 à 4 µm de nitrure de titane sur les parties actives) : diminution de l'effort de coupe et de l'usure d'outil ; bonne résistance à l'abrasion et à la corrosion.

Forets hélicoïdaux monoblocs en carbure

Revêtus ou non revêtus, ils ont une grande durée de vie, avec : des vitesses de coupe élevées (jusqu'à 120 m/min dans les aciers alliés) ; de fortes avances (jusqu'à 0,6 mm/tr pour les plus gros diamètres.

Ils produisent une faible surcote de perçage (0,02 à 0,05 mm) avec : une bonne précision de positionnement ; un très bon état de surface.
Leurs diamètres les plus courants sont de 3 à 20 mm.

Forets à plaquettes carbure indexées ou brasées

Avec des plaquettes spécifiques en forme et matériau, revêtues (carbonitrure de titane ou Al_2O_3) ou non revêtues, à goujures droites ou hélicoïdales : perçage de tous matériaux (dont exotiques, aciers fortement alliés, alliages d'aluminium, plastiques) dans les diamètres de 17 à 30 mm en général.
Vitesses de coupe très élevées (jusqu'à 400 m/min) sous arrosage par le corps d'outil, jusqu'à des profondeurs de 10 diamètres.

Revêtement des plaquettes

Il s'oppose à la formation d'arête rapportée et assure une longue durée de vie favorable en production entièrement automatisée.

Goujures droites

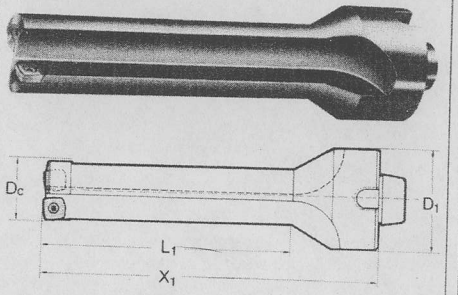
Elles facilitent l'évacuation des copeaux fragmentés : le corps d'outil est rigidifié, réduisant déviation et vibrations éventuelles (fig. 11.12).

Corps d'outil

Sa rigidité assure : une très bonne précision en rectitude et diamétrale jusqu'à la profondeur de 4 diamètres ; la non-déviation à l'attaque (erreur de positionnement de quelques centièmes) ; un bon état de surface (0,8 Ra).

Utilisation

En particulier, usinage dans les cas difficiles : trous avec bavures d'estampage ; attaque sur face forgée, coulée ou laminée, courbe ou inclinée ; coupe interrompue.
Selon leur diamètre, de 16 à 60 mm, le nombre de plaquettes varie de 1 à 7 (avec lubrification par le corps d'outil).
Les forets à plaquettes ou embouts carbure rapportés, avec lubrification par le corps d'outil, ont des diamètres généralement de 10 à 22 mm (fig. 11.13).



Coupe à droite, modèle court, avec arrivée axiale du liquide de refroidissement

FIGURE 11.12 Foret plaquettes carbure à goujures droites (type stardrill B.3020). *Doc. Novex*

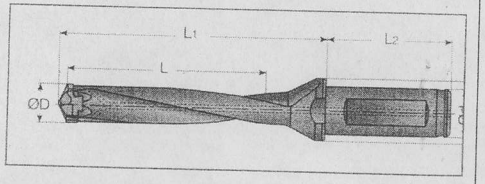


FIGURE 11.13 Foret à embout carbure rapporté interchangeable. *Doc. Iscar*

2.9 Centrage des trous en bout d'arbre

(Centres de prise de pièces cylindriques) Utiliser les forets à centrer (NF E 66.051, A, B, R ou W et DIN 333, A, B, R ou W) en série normale, longue et extra-longue, avec arêtes coupantes au profil angulaire de 60° (fig. 11.14).

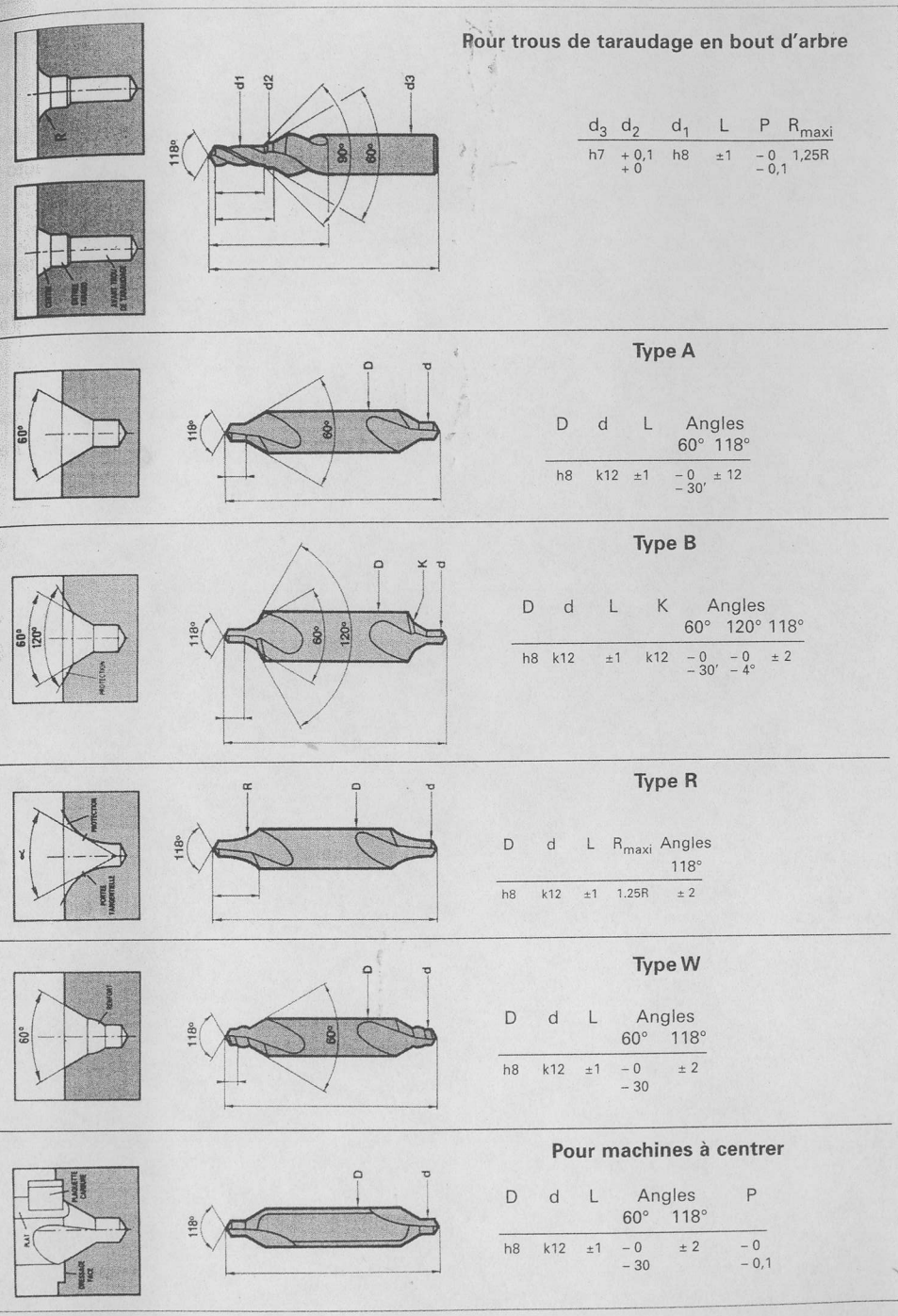


FIGURE 11.14 Différents forets à centrer. *Doc. Magafor*

Forets à centrer de type A

(NF 66.051) Ils permettent uniquement de réaliser le profil angulaire de 60°.
Les diamètres courants D × d sont de : 2 × 0,5 à 31,5 × 12,5 mm.

Forets à centrer de type B

Réalisation du profil de 60° et d'un chanfrein de protection de 120° et facilitant la prise automatique des pièces entre pointes.
Les diamètres courants D × d sont de 3 × 0,5 à 31,5 × 10 mm.

Forets à centrer de type R

Réalisation d'un profil curviligne, assurant une grande précision de prise de pièce entre pointes ; portée tangentielle précise de la pointe support, tout en protégeant le centre contre les chocs).
Les diamètres courants D × d sont de 3 × 0,5 à 31,5 × 12,5 mm.

Forets à centrer type W

(NF E 66.051 - W et DIN 333 - W). Avec un bourrelet qui renforce l'outil et produit une rainure circulaire (améliore la lubrification de la pointe support).
Les diamètres courants sont de 3 × 0,5 à 25 × 10 mm.

Série longue

La longueur totale des forets à centrer varie de 60 à 200 mm.

Décolletage

Les forets à centrer, de type A, B et R, sont à coupe à gauche, dans les diamètres courants D × d de 3,15 × 0,5 à 20 × 8 mm.

Machines à centrer-dresser

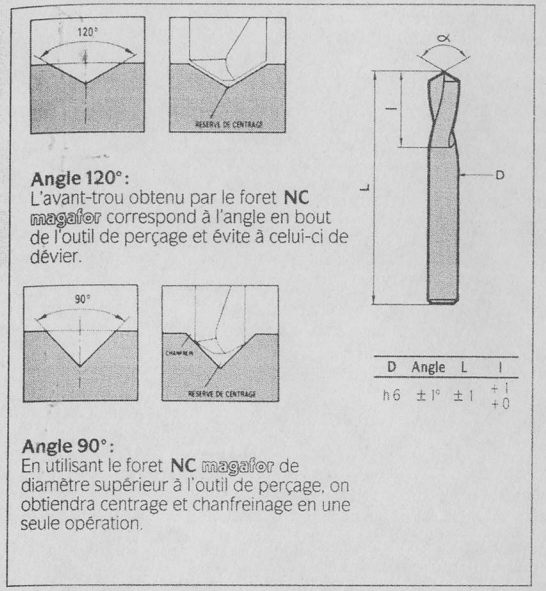
Les forets de type A, B, R, peuvent être conçus avec un plat sur le diamètre D pour recevoir une plaquette (carbure) de dressage simultané.

Trous de taraudage en bout d'arbre

En travaux de série, utiliser des forets réalisant en une seule opération : perçage du cône de prise de pièce, du trou de taraudage et chambrage de l'entrée du taraud.
Les forets à centrer-percer-chambrer sont des types A, B, R, pour les diamètres de taraudage de M4 à M24.
Pour machines à centrer-dresser, ils peuvent avoir : un plat de logement d'une plaquette (carbure) de dressage ; des rainures de lubrification.

2.10 Pointage des trous à positionnement précis

Sur MOCN, utiliser les forets à pointer, en série normale et en série longue (200 mm pour les grands diamètres) (fig. 11.15).
Ils sont conçus à coupe à droite ou à gauche : aux diamètres 3 à 12 mm ; à queue conique (CM) pour les grands diamètres (de 16 à 25 mm) ; de rigidité équivalente aux forets de perçage.
Utilisation systématique pour positionner les perçages avec MOCN.



Forets à pointer d'angle de pointe à 120°

Identique à celui des forets de perçage ; toute possibilité de déviation à l'attaque est supprimée.
Les diamètres courants sont de 3 à 25,4 mm.

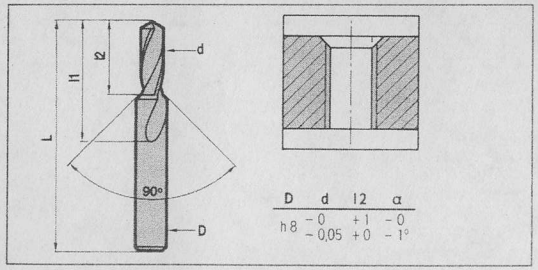
Forets à pointer d'angle de pointe à 90°

(NF E 66.052) À utiliser d'un diamètre supérieur à celui du foret de perçage, assurant pointage et chanfreinage du trou dans une seule opération.
Les diamètres courants sont de 2 à 25,4 mm.

FIGURE 11.15
Forets à pointer.
Doc Magafor

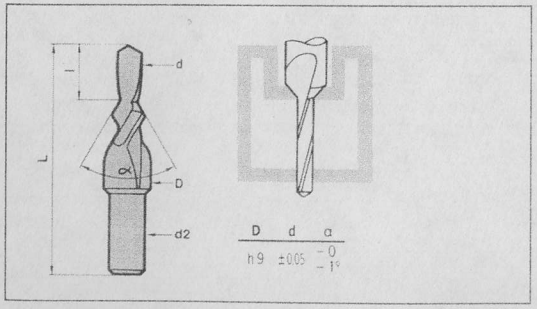
2.11 Perçage des trous de taraudage

En travaux de série, utiliser des forets étagés réalisant en une seule opération perçage et chanfreinage du trou (fig. 11.16).



Conception : rigide, à queue cylindrique (diamètre de queue supérieur au diamètre nominal) ; pour les diamètres de taraudage M3 à M12 avec longueurs de perçage de 8 à 30 mm selon diamètre.

FIGURE 11.16
Foret étagé de perçage-chanfreinage avant taraudage. *Doc Magafor*



Perçage des trous de taraudage avec tête de vis à 90° et avant-trous

En travaux de série, utiliser des forets étagés (fig. 11.17). Ces forets sont conçus :

FIGURE 11.17
Foret étagé de perçage avant-trou et tête de vis.
Doc Magafor

À queue cylindrique pour diamètres de taraudage M3 à M12 avec longueur de perçage du trou de taraudage de 9 à 30 mm selon les diamètres.
À queue conique : CM1, pour diamètres de taraudage M8 à M12 ; CM2 pour M14 à M20 ; longueur de perçage de 20 à 48 mm, selon les diamètres.

2.12 Chambrage des logements des têtes de vis

Logements des têtes de vis fraisées, conicité 90°

Utiliser des forets étagés, des fraises à chambrer, des fraises à noyer.

Forets étagés

Réalisation, en une seule opération, du passage de vis et du logement de la tête de vis.
De conception en ARS, à goujures hélicoïdales, pour vis des diamètres M2 à M12, longueurs de perçage du passage de vis 6 à 28 mm, selon les diamètres (fig.11.18).
Pour des perçages profonds dans les matériaux tendres (agglomérés...) et d'accès difficile dans les profilés, on utilisera des forets étagés de série longue.

Forets étagé avant-trou taraudage
Angle de passage des 2 diamètres α 90°
Queue cylindrique
Denture hélicoïdale à droite 30°
Double goujure
Coupe à droite
acier Super Rapide

FIGURE 11.18 Foret étagé pour avant-trou de taraudage et passage de vis. *Doc. Leclerc*

Fraises à chambrer

Monoblocs, partie active et pilote, avec queue d'entraînement.
Le pilote assure le centrage de l'outil dans le trou préalablement percé (au diamètre de passage de vis ou de trou d'avant taraudage) ; il est à ajustement fin ou moyen, selon la précision de coaxialité désirée (fig.11.19).
Elles sont de conception : à queue cylindrique pour vis de diamètre M1 à M12 ; à queue conique (CM2 à CM3, selon les diamètres) pour vis M12 à M16.

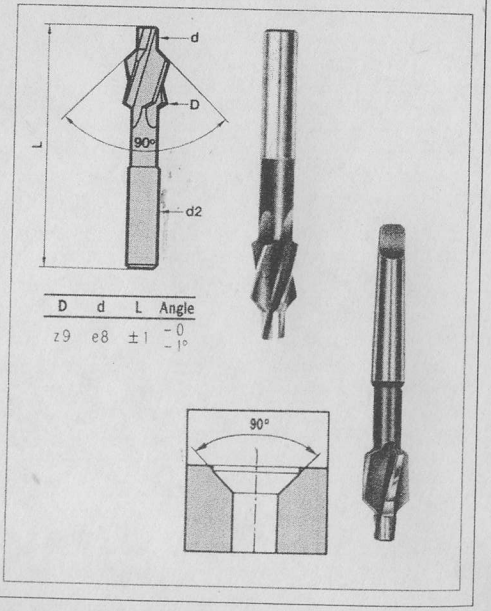


FIGURE 11.19
Fraise à chambrer monobloc.
Doc. Magafor

Fraises à noyer

Monoblocs, avec trois dents assurant : auto-centrage dans le trou préalablement percé ; coupe sans vibrations (fig.11.20).
Leurs dimensions courantes, au grand diamètre du cône, sont de 4 à 50 mm avec : queue cylindrique jusqu'au diamètre 10, queue conique ou cylindrique au-delà de 10 mm.
Elles permettent également le chanfreinage (voir chapitre « Procédés de fraisage »).

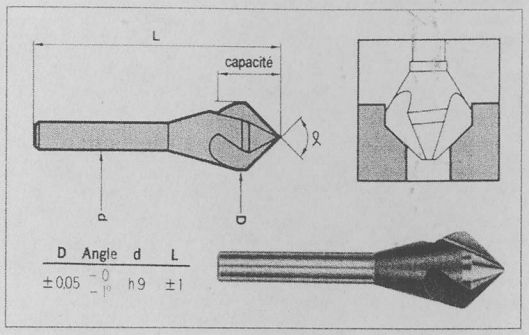


FIGURE 11.20 Fraise à noyer monobloc, 3 dents. *Doc. Magafor*

Logements des têtes de vis à fond plat (cylindriques, hexagonales...)

Utiliser des forets étagés, des fraises à chambrer, des fraises à lamer et chambrer.

Forets étagés

Réalisation, en une seule opération du passage de vis et du logement de la tête de vis (fig.11.21).

Foret étagé pour chambrage
Logement des vis six pans creux
Angle de passage des 2 diamètres α 180°
Queue cône Morse

FIGURE 11.21 Foret étagé pour tête de vis à fond plat. *Doc. Leclerc*

De conception en ARS, à goujures hélicoïdales, ils sont : à queue cylindrique pour les vis des diamètres M3 à M10, à queue conique pour les vis M5 à M20.
Longueur de perçage de 13 à 43 mm selon les diamètres.

Fraises à chambrer

Pour chambrage avec guidage de l'outil par le pilote se centrant dans le trou de passage de vis préalablement percé.
Le pilote est à ajustement fin ou moyen, selon la précision de coaxialité désirée (fig. 11.22).
Elles sont de conception monobloc : à queue cylindrique pour vis de diamètres M1 à M12 ; à queue conique (CM2 à CM4, selon les diamètres) pour les vis de M12 à M24.

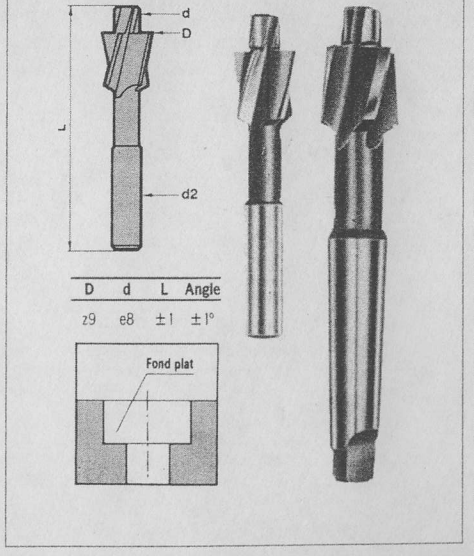


FIGURE 11.22
Fraise à chambrer monobloc.
Doc. Magafor

Fraises à lamer et chambrer

Pour chambrage et lamage à partir du trou préalablement percé guidant le pilote.
De conception à quatre dents, en ARS ou à lames en carbure brasées ou à plaquettes amovibles : à monter sur queue avec tenon d'entraînement ou monoblocs et pilote amovible.
Les pilotes réduisent l'outillage porte-outil (exemple : les fraises à lamer des diamètres 24 à 34 ont un même diamètre d'alésage support pilote de 9,5 H7 (fig. 11.23).

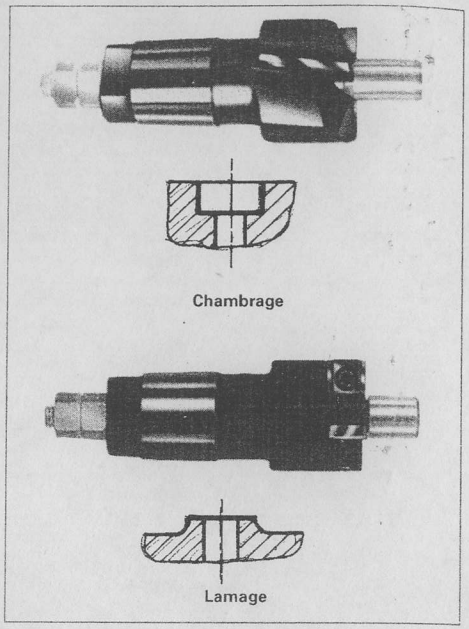


FIGURE 11.23
Fraise à lamer et chambrer à pilote avec cône court.
Doc. Guhring

Fraises à lamer pour moulistes

À utiliser pour logements des têtes d'éjecteurs dans les moules métalliques, avec ajustement précis du pilote.
Pour diamètres d'éjecteurs de 2 à 10 mm (fig. 11.24).

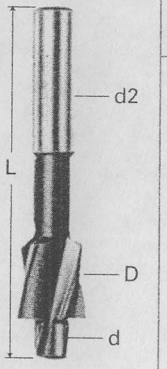


FIGURE 11.24
Jeu de fraises à lamer pour moulistes (logements têtes d'éjecteurs).
Doc. Magafor

HSS 8% COBALT M42

Ø éjecteur ejector	D x d	L	d2
2	4,2 x 2,0	60	D
2,5	5,2 x 2,5	60	D
3	6,2 x 3,0	60	D
4	8,2 x 4,0	60	D
5	10,2 x 5,0	90	10,0
6	12,2 x 6,0	90	10,0
8	14,2 x 8,0	90	12,5
10	16,2 x 10,0	90	12,5

2.13 Ébavurage des trous

Utiliser des fraises coniques à chanfreiner à trou ou à dents.
Elles peuvent également réaliser des chanfreins.
Leur conicité est généralement de 90°, mais aussi de 60°, 82°, 100°, 120°.

Fraises à ébavurer à trou

Recommandées pour l'usinage de matériaux tendres (alliages d'aluminium, plastiques...) Leurs diamètres à la base du cône sont de 10 à 80 mm (fig.11.25).
Pour chaque fraise : diamètre minimum du trou à ébavurer ≅ 1/2 diamètre de la base du cône, diamètre maximum = diamètre de la base du cône moins 1 à 2 mm, selon les fraises.

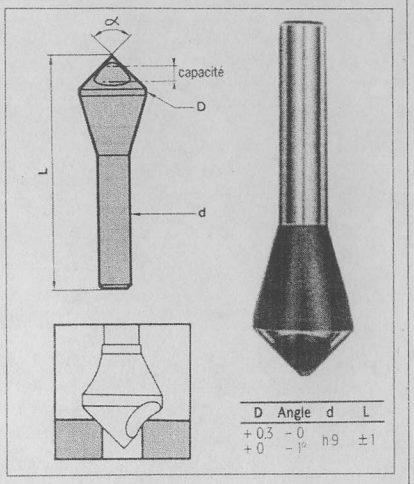


FIGURE 11.25
Fraise à ébavurer à trou.
Doc. Magafor

Fraises à chanfreiner à une dent

Elles peuvent être utilisées en ébavurage, en particulier dans les matériaux tendres (fig.11.26).
Diamètre minimum du trou à ébavurer = 1 à 3 mm selon les fraises, soit au voisinage du sommet du cône.
Matériaux tendres (bois et agglomérés, plastiques) et de faible épaisseur, effectuer le perçage du passage de vis et le chanfreinage dans une seule opération.
Capacité maximale de ces fraises = diamètre de la base du cône.
La conicité peut être de 30°, 45°, 60°, 82°, 90°, 100°, 120° pour des diamètres à la base du cône de 6 à 80 mm.

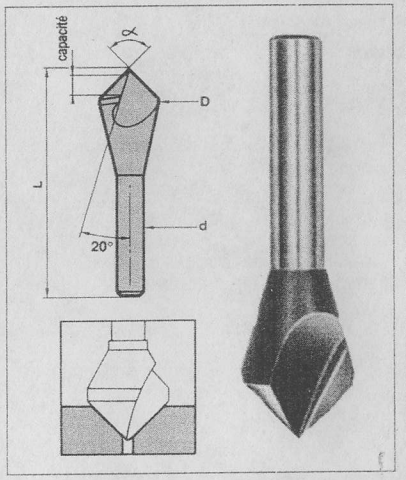


FIGURE 11.26
Fraise à chanfreiner une dent.
Doc. Magafor

Fraises à lamer conique

À 3 ou 4 dents, de conicité 60° et 90° ; diamètres à la base du cône = 8 à 46 mm.
À monter sur support avec un pilote au diamètre du trou préalablement percé (fig. 11.27).

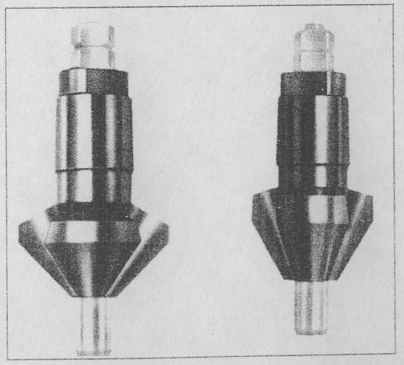


FIGURE 11.27
Fraise à lamer conique 3 dents, 60° et 90° ; avec pilote.
Doc. Guhring

Fraises coniques « une taille »

À chanfreiner (chapitre « Procédés de fraisage ») monoblocs à queue cylindrique ou conique : effectuent également l'ébavurage.
Ces fraises sont de conicité 60° et 90°, avec des diamètres à la base du cône de 10 à 40 mm.

2.14 Perçage des trous à diamètre relativement grand

Utiliser les lames « langues d'aspic », les lames spirales, les forets de carottage, dans les pièces minces en particulier.

Lames « langues d'aspic »

Perçage sans avant-trou des diamètres 5 à 130 mm, en général.
Ces lames se montent sur porte-outils spécifiques à queue conique.
Lubrification. Par le centre du porte-outil ; assure la meilleure utilisation (lubrification de la pointe et évacuation des copeaux) (fig. 11.28).
Affûtage. Sur les faces de coupe (les faces de dépouille ayant généralement des brise-copeaux) : conserver l'amincissement de la pointe qui assure le centrage d'outil et réduit l'effort de poussée.

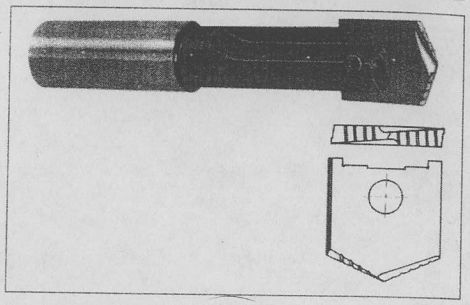


FIGURE 11.28 Lame « langue d'aspic » et porte-lame.
Doc. Leclerc

Lames spirales

Perçage, avec un avant-trou pour assurer le guidage par un pilote, des diamètres 30 à 160 mm en général.
Ces lames se montent sur porte-outils spécifiques avec pilote.
Les porte-lames sont conçus pour des paliers de diamètres de perçage (exemple : porte-lame, avec pilote de diamètre 46 mm, pour des lames de 101 à 160 mm) (fig. 11.29).
Affûtage. Outils à profil constant, affûtables de nombreuses fois sur les faces de coupe (essentiellement) tout en conservant la symétrie des arêtes de coupe.

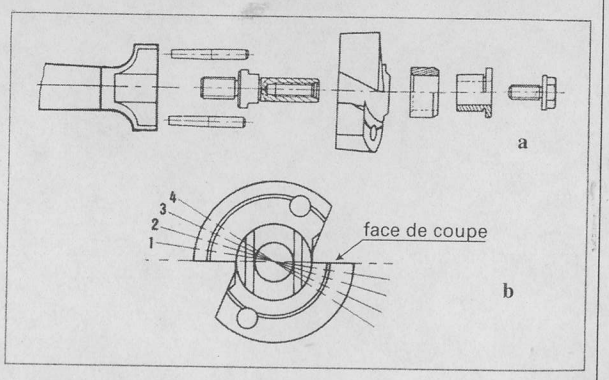


FIGURE 11.29 Lame spirale
a - avec éléments du porte-outil
b - affûtages successifs de la lame
Doc. Leclerc

Conditions de coupe

On considère : vitesses de coupe de 20 % inférieures à celles des forets de même matériau (acier rapide) et vitesses d'avance de 20 % supérieures.

Vitesses de coupe : 8 à 30 mètres/minute selon les matériaux.
Vitesses d'avance : 0,15 à 0,50 mm/tour selon les diamètres et les matériaux usinés (fig. 11.30).

Matière	V m/min		Diamètre des lames 25	33	40	50	62	80	100	125
Acier non allié jusqu'à 70 daN/mm²	20	f	0,20	0,20	0,25	0,32	0,32	0,40	0,50	0,50
		n	255	200	160	125	100	80	65	50
		kw	1,25	1,70	2,10	3,30	4,10	6,80	8,80	10,60
Acier allié jusqu'à 80 daN/mm²	15	f	0,20	0,20	0,25	0,25	0,30	0,30	0,40	0,40
		n	190	190	120	95	80	60	50	40
		kw	1,50	2,70	2,00	2,50	3,90	4,80	8,40	10,50
Acier allié au-dessus	10	f	0,15	0,15	0,20	0,25	0,25	0,25	0,30	0,40
		n	150	130	100	80	65	50	40	32
		kw	0,90	1,40	2,00	2,10	2,60	3,40	5,00	8,40
Acier doux	30	f	0,20	0,20	0,25	0,32	0,32	0,40	0,50	0,50
		n	400	315	250	200	160	125	100	80
		kw	2,30	3,20	4,10	6,56	8,10	13,10	19,00	23,75
Fonte jusqu'à 200 Brinell	20	f	0,25	0,32	0,40	0,50	0,50	0,50	0,60	0,60
		n	280	260	180	140	120	90	70	60
		kw	0,90	1,80	2,30	3,15	4,20	5,20	7,80	10,10
Fonte au-dessus de 200 Brinell	8 à 10	f	0,20	0,20	0,20	0,25	0,30	0,40	0,50	0,50
		n	125	100	80	60	50	40	30	25
		kw	0,40	0,60	0,70	1,20	1,40	2,50	3,20	4,10
Cuivre et bronze	20	f	0,20	0,20	0,30	0,40	0,40	0,50	0,50	0,60
		n	230	210	160	130	105	80	60	50
		kw	0,75	1,20	1,70	2,90	3,50	5,10	6,00	9,40
Laiton Ms 58-50	30	f	0,20	0,20	0,25	0,30	0,30	0,40	0,50	0,50
		n	380	320	240	190	160	125	100	80
		kw	0,60	0,90	1,00	1,40	1,90	3,20	4,50	5,60

FIGURE 11.30 Conditions de coupe recommandées pour lames. *Doc. Leclerc*

Forets de carottage

Réalisation en une seule opération, des trous de grand diamètre (de 120 à 220 mm, généralement) tout en produisant une chute cylindrique, la carotte.
Ces forets, ou têtes de carottage, sont constitués d'une couronne supportant les outils de coupe. Ils se montent sur des porte-outils spécifiques (tubulaires).
Ils permettent de récupérer de la matière en perçage de grands diamètres dans des pièces de toutes épaisseurs.

2.15 Perçage des trous longs

Éviter la déviation d'outil durant sa trajectoire, avec :
Un angle de direction d'arête κ_r (kappa r) maximum (voisin de 90°) annulant les poussées latérales.
Des patins d'auto-guidage sur la tête de perçage, agissant après guidage à l'attaque par une bague.
Les forêts 3/4 avec tête de perçage (carbure...) produisent des trous longs – le forage – avec précisions courantes de : IT 7 à 9 ; Ra 0,4 à 1,6 ; circularité < 4 µm (forets Outiltec) (fig. 11.31).
La lubrification sous-pression par le corps d'outil est nécessaire pour la réfrigération et l'évacuation des copeaux.
Machines à commande numérique, pour programmer le perçage avec débourrage : évacua-

tion des copeaux ou arrêts temporisés pour briser les copeaux (facilitant leur évacuation) ou machine spécifique de forage profond.

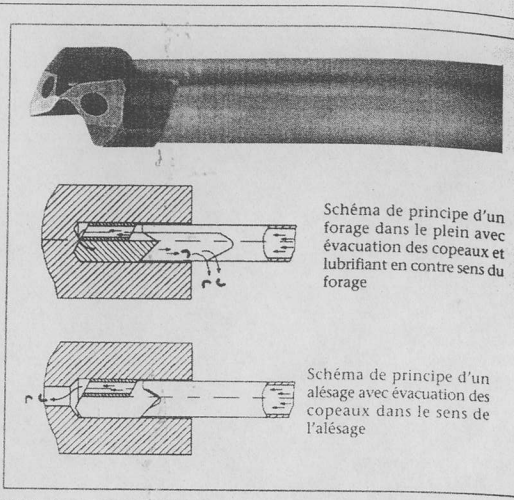


Schéma de principe d'un forage dans le plein avec évacuation des copeaux et lubrifiant en contre sens du forage

Schéma de principe d'un alésage avec évacuation des copeaux dans le sens de l'alésage

FIGURE 11.31
Foret de perçage profond.
a - foret 2 lèvres
b - perçage pleine matière avec foret 3/4
c - perçage trou ébauché avec foret 3/4
Doc. Outiltec

2.16 Cycles des perçages

Les commandes numériques des machines-outils par coupe, de tous types (perçage, fraisage, tournage...) comportent des cycles de perçage automatique pour un trou et un ensemble de trous définis dans le programme d'usinage (fig. 11.32).

Cycles de perçage et pointage

Provoque le perçage automatique à la profondeur programmée.

Cycle de perçage - lamage - chambrage

Provoque le perçage avec un arrêt temporisé à la profondeur programmée pour en assurer la précision de longueur de perçage.

Cycle de perçage profond avec débourrage

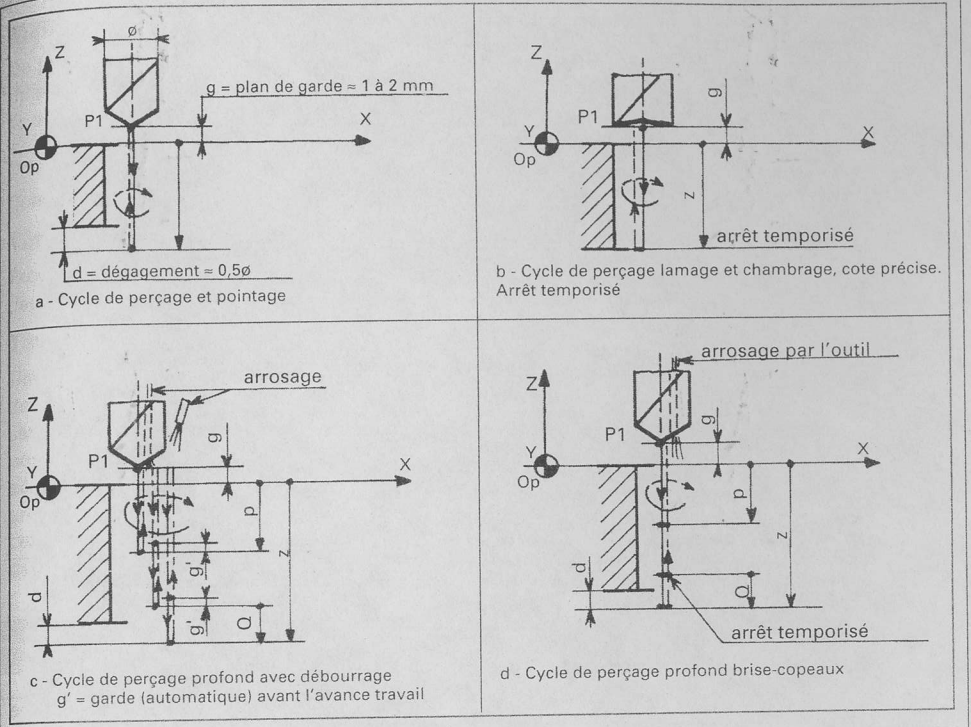
Provoque des séquences successives de perçage de longueurs variant entre la première séquence (P = 2 à 3 diamètres du foret) et la dernière séquence (Q = 1 à 0,5 diamètre) ; la CN détermine les profondeurs intermédiaires.
À chaque séquence, l'outil est dégagé du trou pour évacuer les copeaux (débourrage).
Utilisation : perçage profond avec forêt non lubrifié par le corps ; perçage profond de matériaux à copeaux courts.

Cycle de perçage profond avec brise-copeaux

Provoque des séquences successives de perçage à la fin desquelles un arrêt temporisé de l'avance produit la rupture des copeaux.
Utilisation : perçage profond de matériaux à copeaux longs, avec forets lubrifiés par le corps.

Cycles de positionnement automatique du foret

Intégrés dans la CN de perceuses en particulier (fig. 11.33).



a - Cycle de perçage et pointage

b - Cycle de perçage lamage et chambrage, cote précise. Arrêt temporisé

c - Cycle de perçage profond avec débourrage
g' = garde (automatique) avant l'avance travail

d - Cycle de perçage profond brise-copeaux

FIGURE 11.32 Cycles fixes de perçage sur MOCN.

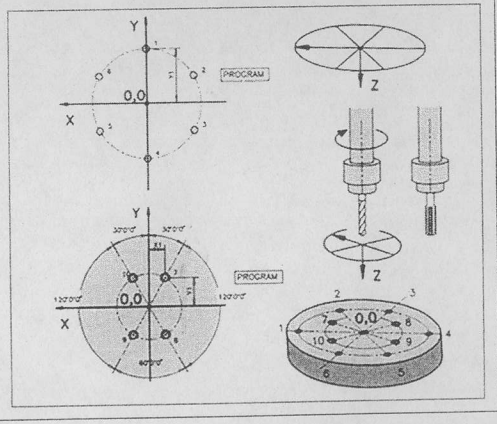


FIGURE 11.33
Schéma de cycle de positionnement automatique en perçage.
Doc. Sermac

2.17 Mouvements de génération

- **Mouvement de coupe donné :**
  - À l'outil sur perceuses, fraiseuses, centres d'usinage, centres de tournage.
  - À la pièce sur tours, centres de tournage (avec trou concentrique à l'axe de rotation de la pièce).

- **Perçage, mouvement de coupe donné à la pièce.**
- Avec foret à arêtes rapportées et angle de direction d'arête Kr = 90° : il est possible de percer à un diamètre sensiblement supérieur à celui du foret (de 0,5 à 4 mm de départ d'axe d'outil) (fig. 11.34).
- Perçage débouchant, il y a éjection d'une rondelle à la sortie d'outil (cartérisation impérative).
- Réduire la vitesse d'avance de 20 à 50 %.

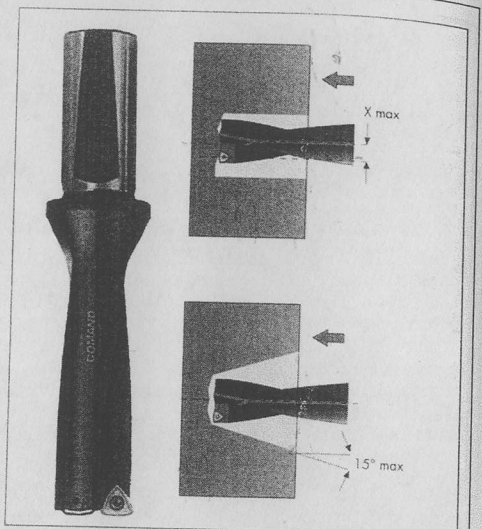


FIGURE 11.34
Perçage avec foret (à plaquettes carbure) désaxé (pièce tournante).
Doc. Comand

2.18 Appareillages porte-outils

Ils doivent assurer mise en position et démontage rapides du foret dans la broche, avec une excellente concentricité outil/porte-outil/broche.

Mandrins porte-foret

Fixés sur queue d'entraînement, ils maintiennent les forets à queue cylindrique, avec serrage-desserrage rapide.

Perçage critique. Risque de rupture de petits forets en perçage en pleine matière de matériaux durs : contrôle des efforts de coupe avec appareil (à jauges de contraintes) intermédiaire entre mandrin et attachement (système « Intelli-Tool » de Sandvik Coromant) (fig. 11.35).

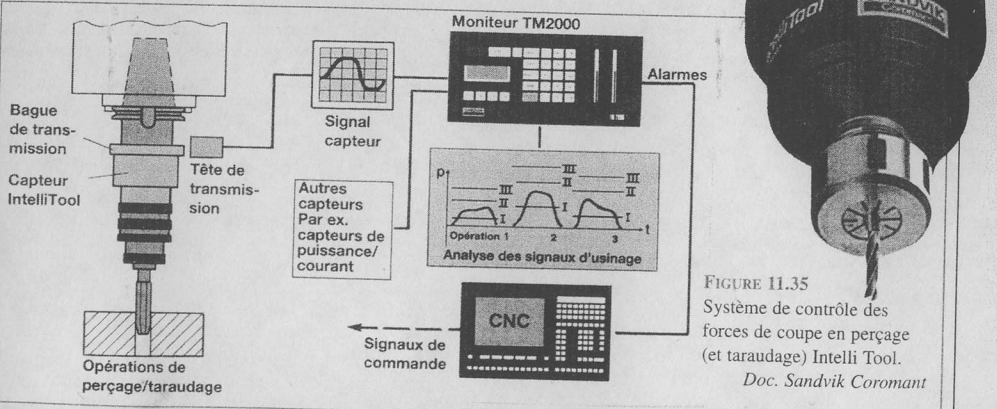


FIGURE 11.35
Système de contrôle des forces de coupe en perçage (et taraudage) Intelli Tool.
Doc. Sandvik Coromant

Mandrins à pinces

De petits diamètres à queue cylindrique : assurent une excellente concentricité outil/porte-outil et un serrage efficace.
Ils acceptent des fréquences de rotation élevées (20 000 tr/min) sans vibrations.

Têtes de perçage

Conçues pour optimiser (temps de production ; nombre de phases) sur MOCN.

Tête à broches multiples

Production de grande série (usinage transfert) : perçage simultané de diamètres et profondeurs différents ou non.

Têtes angulaires

Usinage, sur machines à CN, dans des directions non cartésiennes sans avoir à changer la pièce de position (nombre de phases réduit) ; perçages de position géométrique précise (fig. 11.36).
Les outils, avec leur porte-outils respectifs, sont à changement rapide.

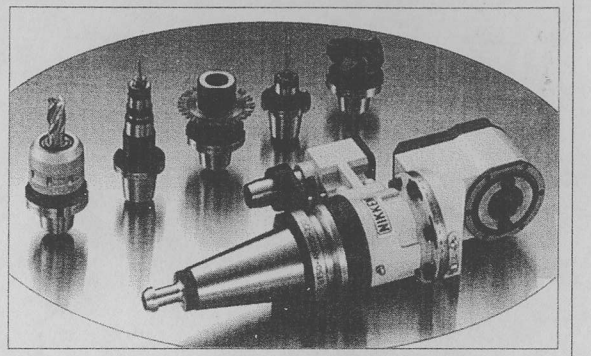


FIGURE 11.36
Tête à renvoi d'angle (à changement rapide)
Doc. Nikken

1.19 Machines de perçage

Elles doivent assurer un positionnement rapide et le plus précis possible des outils (perçages successifs sur une ou plusieurs pièces installées sur table-machine).

Perceuses à CN

À broche verticale 3 axes (x y z) pour tous les travaux en point à point (perçage, taraudage...) (fig. 11.37).
Du fraisage léger en paraxial est généralement réalisable sur ces machines pour pièces à percer comportant peu de fraisage dans la phase.

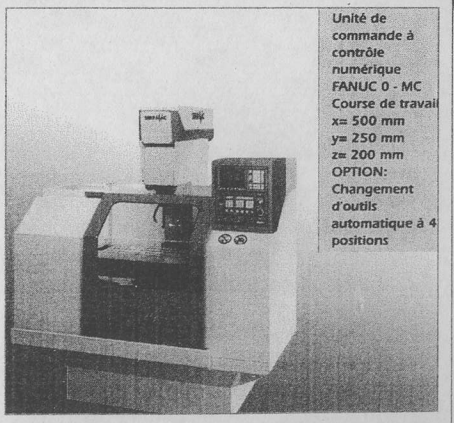


FIGURE 11.37
Perceuse à commande numérique.
Doc. Sermac

11

Des cycles de recherche d'origine automatique (centre de surfaces prismatiques et cylindriques), équipent des perceuses à CN (fig. 11.38).
Différentes figures géométriques situant un réseau de trous identiques sont programmables. (perçages successifs automatiquement).
Menus de perçage, programmation interactive par apprentissage optimisent la mise en œuvre.
Capacité. Le diamètre de perçage maximum, dans l'acier, est généralement de 40 mm et le taraudage de M 26, pour les perceuses à CN.

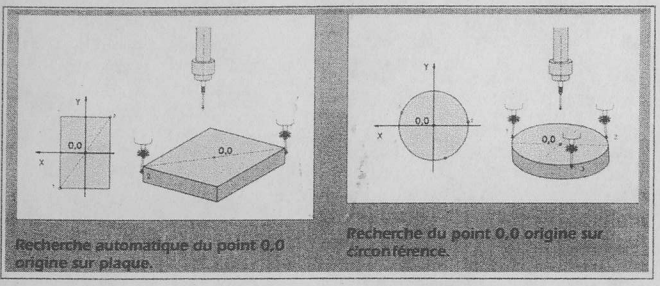


FIGURE 11.38
Cycles de recherche automatique d'origine pièce sur perceuse CN.
Doc. Sermac

Centres de perçage

Avec la tourelle porte-outils, perçage automatique de l'ensemble des trous de diamètres différents sur la plupart des pièces.
Caractéristiques principales. Rapidité de changement d'outils (quelques sec.) ; vitesse des déplacements ; précision de positionnement en x y (0,02 à 0,01 mm) ; répétabilité à 0,005 mm ; programmation conversationnelle et banque de données.

3. Procédés de perçage par érosion

3.1 Procédés de perçage au laser

Généralités

Perçage avec des lasers de puissance délivrant des impulsions qui vaporisent le matériau usiné (voir « Procédés de découpe et assemblage »).
Un puits capillaire se crée, dont les parois entrent en fusion ; la vaporisation s'effectue dans l'axe du faisceau produisant une surpression qui éjecte la matière fondue.
Le perçage s'effectue en plongée (tamponnage) ou en découpe orbitale (trépannage), selon le diamètre du trou à obtenir.

Tamponnage

Avec des impulsions dans l'axe du trou, on perce de petits diamètres limités par la focalisation du faisceau (quelques mm au minimum).

Trépannage

Avec des impulsions et un mouvement orbital de l'optique de focalisation, on effectue une découpe circulaire.

Conditions d'utilisation

Profondeur de perçage

Elle est limitée par le rapport profondeur/diamètre du trou et la possibilité d'évacuation de particules en fonction des matériaux usinés.

Vitesse de perçage

Elle est très rapide, particulièrement en perçage tamponnage. C'est le temps de déplacement d'un trou à l'autre qui conditionne la productivité, avec le chargement-déchargement de la pièce.

Utilisation

Perçage de très petit diamètre et de faible profondeur dans des matériaux difficilement usinables par des procédés conventionnels, tel que le perçage du diamant.
On l'utilisera éventuellement en travaux de série dans divers matériaux durs (fig. 11.39).
L'usinage peut s'effectuer avec attaque sur des surfaces en différentes positions, voire peu accessibles.

Machines

Elles sont à pièce ou à laser mobile (fig. 11.40).
Avec une machine adaptée, les perçages peuvent s'effectuer dans toutes directions.

Laser employé en perçage

Du type solide pulsé YAG et verre dopé néodyme ou Alexandrite pour alliages cuivreux, avec possibilité de trépannage par perçages successifs.

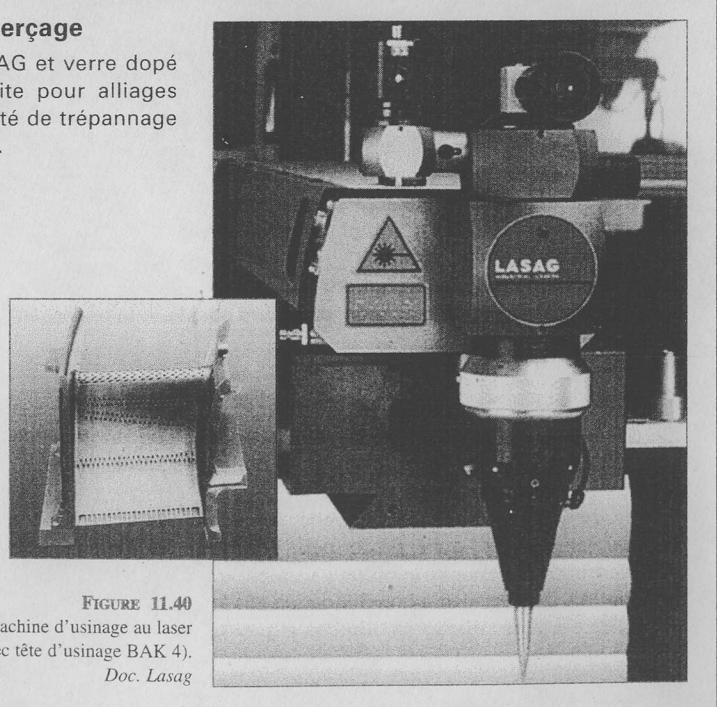


FIGURE 11.39
Opération de perçage au laser (aube de turbine d'avion).
Doc. Lasag

FIGURE 11.40
Élément de machine d'usinage au laser (perçage avec tête d'usinage BAK 4).
Doc. Lasag

3.2 Procédés de perçage par ultrasons

Généralités

Microcassure de la matière par projection de particules de poudre abrasive en suspension dans un liquide, situées entre la pièce et un barreau-outil (la sonotrode) vibrant à fréquence élevée sous excitations ultrasoniques (voir « Procédés d'assemblage »).
La turbulence créée par la cavitation, qui résulte d'ondes de pressions et de dépressions successives en un même point, facilite la circulation de la solution abrasive.
La cavitation est provoquée par une densité de puissance acoustique (1 à 2 watts/cm^2 pour l'eau, à la fréquence de 20 000 Hz).

Énergie vibratoire

Elle est communiquée aux grains d'abrasif suivant l'avance de l'outil dans la pièce donnée par une légère pression.
Les grains d'abrasif sont en suspension dans la lame liquide (l'eau généralement) située entre la pièce et la sonotrode et qui vibre dans la même direction que la sonotrode.
Les mouvements vibratoires sont provoqués par un générateur d'ultrasons dont les vibrations électriques sont transformées en vibrations mécaniques par l'intermédiaire d'un transducteur.
La sonotrode projette, comprime et martèle les grains d'abrasif sur la pièce, produisant les microruptures dans le matériau.
Le générateur électronique de courant basse fréquence, réglable en puissance, fournit un signal compris entre 20 000 et 40 000 hertz.
À l'extrémité de la sonotrode est fixé un embout de la forme du profil à obtenir en perçage (rond, carré, hexagonal...) qui reçoit le mouvement d'avance rectiligne alternatif (sans autre mouvement).
Le matériau utilisé pour l'embout est généralement en laiton ou en acier non trempé (pas de contact avec la pièce).

Abrasif utilisé

Il doit être plus dur que le métal usiné ; généralement le carbure de bore (le plus dur, après le diamant, léger, résistant aux agents chimiques et de point de fusion élevé).
Il est utilisé en poudre de granulométrie (de 120 à 600) choisie en fonction de la matière à usiner et de la précision à obtenir.
Le perçage s'effectue généralement en une seule passe.
Pour obtenir une grande précision, plusieurs passes sont nécessaires avec des granulométries différentes.

Vitesse d'avance

Elle dépend du volume de matière à enlever et de contraintes technologiques.
Il est préférable de percer des formes de petites sections.
Contraintes technologiques
Amplitude et fréquence des vibrations ; force statique entre la sonotrode et la pièce ; matériau à usiner ; section de l'outil ; profondeur et section de perçage (volume de matière à enlever) ; granulométrie et concentration de l'abrasif.
La variation d'un facteur a une incidence sur le temps d'usinage.
Temps de perçage : quelques minutes à quelques secondes (faibles profondeurs).

Précisions obtenues

Dimensionnelle

Elle est fonction de l'embout (outil de forme travaillant en pénétration). Elle peut atteindre 5 à 10 µm.

État de surface

Elle est fonction de la force statique appliquée sur la sonotrode, de la granulométrie de l'abrasif et de l'amplitude des vibrations.
La rugosité des parois de trous augmente avec l'amplitude des vibrations de la sonotrode.
Une légère conicité des trous résulte du cheminement des grains d'abrasif le long de l'outil et des vibrations transversales.

Utilisation

Perçages de petites sections de forme quelconque, dans des matériaux très durs, cassants, fragiles (verre, céramique, carbures, silicium, germanium...) sans contraintes d'usinage (thermique, chimique, mécanique) et ne pouvant pas être obtenus avec des procédés conventionnels.

Machines

De puissance entre 75 et 1 200 watts ; mouvement d'avance de broche avec guidage à haute précision ; réglage de la pression d'avance ; avec système d'injection et recyclage du liquide abrasif.
Broche animée en rotation. Possibilité d'effectuer de petites fraisures.
Certaines machines peuvent être équipées de plusieurs broches, pour optimiser des usinages.

12 PROCÉDÉS DE RECTIFICATION

1. Généralités 391
2. Procédés de rectification cylindrique 391
   - 2.1 Rectification cylindrique d'extérieur 391
   - 2.2 Rectification cylindrique d'intérieur 392
   - 2.3 Rectification cylindrique sans centres 392
3. Procédés de rectification plane 393
   - 3.1 Rectification plane alternative 393
   - 3.2 Rectification plane en surfaçage 393
4. Procédés de rectification de forme 394
5. Outil – Meule 394
   - 5.1 Formes des meules 395
   - 5.2 Dimensions des meules 396
   - 5.3 Caractéristiques de constitution des meules 396
6. Mode d'action de l'outil - meule 398
   - 6.1 Dureté relative ou dureté d'action 399
7. Condition d'utilisation des meules 399
   - 7.1 Vitesse de rotation des meules 399
   - 7.2 Vitesse de rotation ou de translation des pièces 400
   - 7.3 Vitesse de balayage ou largeur de passe 400
   - 7.4 Profondeurs de passe 400
   - 7.5 Surépaisseurs de rectification 401
8. Mise en œuvre des meules 401
   - 8.1 Aire de contact 401
   - 8.2 Dureté d'action d'une meule 402
   - 8.3 Traces hélicoïdales 403
   - 8.4 Choix d'une meule 403

9. Rectification cylindrique d'extérieur et d'intérieur 404
9.1 Rectification par balayage 404
9.2 Rectification cylindrique d'intérieur 404
9.3 Rectification en plongée 405
9.4 Rectification en plongée oblique 405
10. Rectification sans centres ou centerless 407
10.1 Meule de régulation 407
10.2 Réglette d'appui de pièce 407
10.3 Rectification sans centres en plongée 408
10.4 Rectification sans centres en enfilade 408
10.5 Mise en œuvre 408
11. Rectification en surfaçage 409
11.1 Avec meule à segments 409
11.2 Avec meule boisseau et meule plate 409
12. Lubrification 410
13. Appareillages 410
13.1 Les pièces cylindriques longues 410
13.2 Les pièces cylindriques courtes 410
13.3 Des montages 411
13.4 Les pièces des types plates et cubiques 411
14. Machines 411
14.1 Rectifieuses planes 413
14.2 Rectifieuses cylindriques 414
14.3 Rectifieuses sans centres 414
14.4 Rectifieuses de forme 415

1. Généralités

Obtention d'un état de surfacetrès précis et d'une grande précision dimensionnelle, à l'aide d'outils-meule.
Les meules, tournant à grande vitesse (de coupe), usinent les surfaces à rectifier par abrasion avec les grains coupants agglomérés qui constituent l'outil.
La dureté du matériau usiné n'a qu'une faible influence sur le choix de la meule.

Précisions obtenues

Sur des surfaces de pièces préalablement usinées par coupe et généralement traitées thermiquement :
- Dimensionnelle jusqu'à la qualité 5 voir 4 en atelier climatisé ;
- État de surface : Ra 0,1 à 1,6 µm.
- La rectification effectue la précision en production de pièces mécaniques, économiquement et sans altération significative de la pièce (matériau et surface rectifiée).

Procédés de rectification

Rectification d'extérieur, d'intérieur, sans centres, des pièces cylindriques et coniques.
Rectification plane sur des pièces prismatiques.
Rectification de forme, pour profils divers.

2. Procédés de rectification cylindrique

Rectification d'extérieur, rectification d'intérieur, rectification sans centres. La meule et la pièce sont animées d'un mouvement de rotation provoquant le mouvement de coupe.
Le mouvement d'avance, rectiligne, est donné à la meule ou à la pièce, selon le procédé.

2.1 Rectification cylindrique d'extérieur

La pièce est maintenue en l'air ou entre pointes (sèches). L'usinage s'effectue en balayage ou en plongée.

Balayage

La prise de passe se produit après chaque passe (aller-retour) de la pièce qui se translate devant la meule (fig. 12.1).

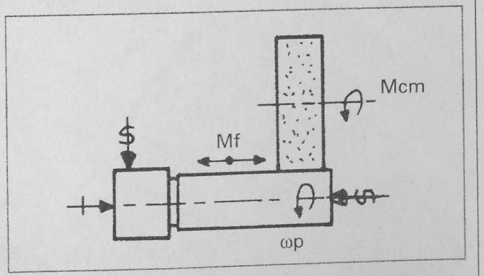
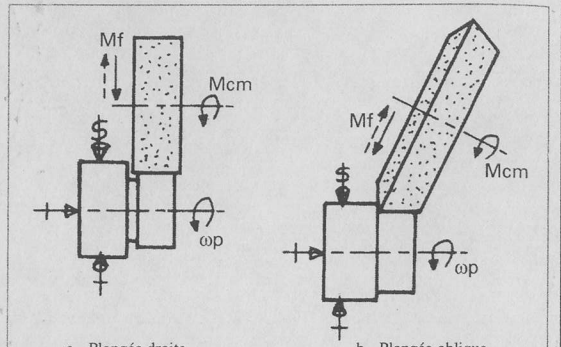


FIGURE 12.1
Schéma de rectification cylindrique d'extérieur en balayage.

Plongée

La meule, d'une épaisseur au moins égale à la largeur à usiner, prend la profondeur de passe par pénétration contre la pièce de façon continue (fig. 12.2).
La plongée est droite (perpendiculaire à l'axe de la pièce) ou oblique (permettant le dressage d'épaulement dans le cycle) selon les machines.

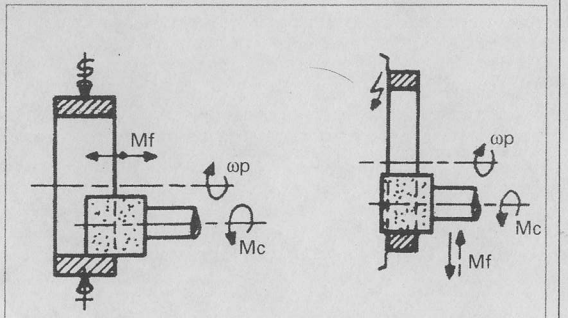


a - Plongée droite b - Plongée oblique

FIGURE 12.2
Schéma de rectification cylindrique d'extérieur en plongée.

2.2 Rectification cylindrique d'intérieur

La pièce est maintenue en l'air, l'usinage s'effectuant comme en extérieur, en balayage ou en plongée (essentiellement droite) (fig. 12.3).



a - Balayage b - Plongée

FIGURE 12.3
Schéma de rectification cylindrique d'intérieur.

2.3 Rectification cylindrique sans centres

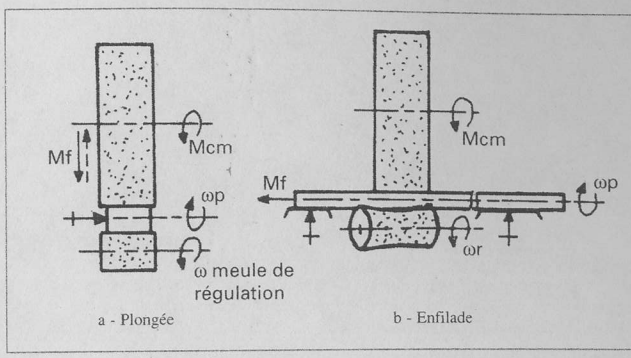
La pièce, uniquement en appui sur une butée, est maintenue au contact de la meule par une seconde meule (de régulation), l'usinage s'effectuant en plongée ou en enfilade (fig. 12.4).

En plongée

Pour des pièces courtes avec plusieurs cylindres ou cônes. La prise de passe est continue contre la pièce.

En enfilade

Pour des pièces longues ou courtes en continu. L'avance s'effectue avec la meule de régulation dont l'axe est incliné par rapport à celui de la pièce.

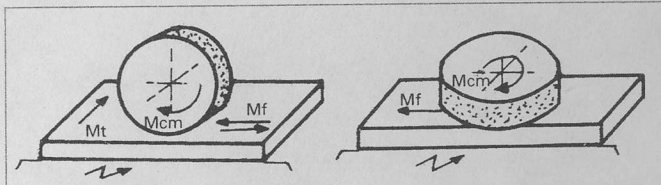


a - Plongée b - Enfilade

FIGURE 12.4
Schéma de rectification cylindrique sans centres.

3. Procédés de rectification plane

Rectification alternative et rectification circulaire ou surfaçage (fig. 12.5).



a - Balayage b - Surfaçage

FIGURE 12.5
Schéma de rectification plane.

3.1 Rectification plane alternative

Obtenue en balayage avec meule plate par la combinaison de deux mouvements rectilignes (alternatif et périodique).
La prise de passe s'effectue, après chaque balayage de la surface, par plongée de la meule.

3.2 Rectification plane en surfaçage

Obtenue avec une meule boisseau (à segments pour le débit) travaillant de face sur toute la largeur de surface à rectifier.
Le mouvement d'avance est donné à la pièce (rotation ou translation de la table porte-pièce).
La prise de passe s'effectue après chaque course de la table.

4. Procédés de rectification de forme

Obtention de surfaces fonctionnelles précises, la meule générant le profil à obtenir par sa forme ou par une cinématique donnée.

5. Outil-meule

Outil circulaire tournant à grande vitesse (de 20 à 100 m/s)
Il est constitué de grains d'abrasif très durs qui travaillent par grattage de la surface usinée, produisant des micro-copeaux. Avec la multitude de grains constitutifs, réalisation d'un très bon état de surface.
La dureté des grains d'abrasif permet l'usinage des matériaux très durs, tels les aciers trempés.

Les grains d'abrasif se comportent comme des outils de grattage, avec un angle de coupe quelconque (fig. 12.6). Les micro-copeaux obtenus sont de très faible section (0,01 à 0,001 mm^2).
Chaque grain, enrobé par un liant (l'agglomérant) s'use, se fragmente, s'émousse et s'échauffe au contact de la surface travaillée, ce qui provoque son déchaussement par rupture du liant échauffé.
Chaque couche de grains déchaussés laisse apparaître une couche de grains neufs. Un grand nombre de grains travaillant simultanément, il y a production de nombreux micro-copeaux.

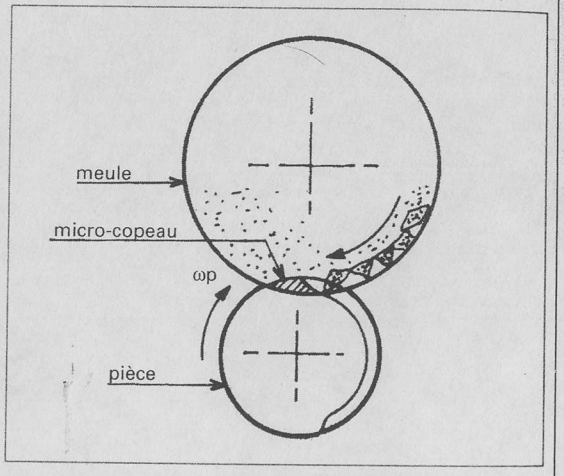


FIGURE 12.6 Schéma d'action de coupe des grains d'abrasif.

Les meules ont des formes qui correspondent à leurs utilisations. Elles sont définies en fonction de leurs caractéristiques de fabrication : forme, dimensions, constitution.
Elles sont normalisées d'après leur forme (NF - E - 75-201) et leurs dimensions (NF - E - 75-202 à 206).
La désignation générale des meules, figurant sur chacune d'elles, précise dans l'ordre : le numéro du type de forme ; les trois dimensions D, E, d ; les caractéristiques de constitution, avec la vitesse de rotation maximale admise (afin d'éviter tout éclatement que provoquerait la force centrifuge).

5.1 Formes des meules

Chaque forme de meule est identifiée par un numéro du type (1 à 28) pour les meules d'enveloppe et par une lettre majuscule (A à P) pour les différents profilés des meules de forme (fig. 12.7).
Les formes de meules sont des types : 1 : plates ; 5 : à un embrèvement ; 7 : à double embrèvement ; 6 : boisseau droit ; 11 : conique ; 12 : assiette ; 14 : à moyeu déporté ; 2 : cylindrique...

Nota : Sauf pour les meules de forme qui doivent réaliser un profil donné, les meules travaillent avec une surface abrasive définie (périphérie ou une face).

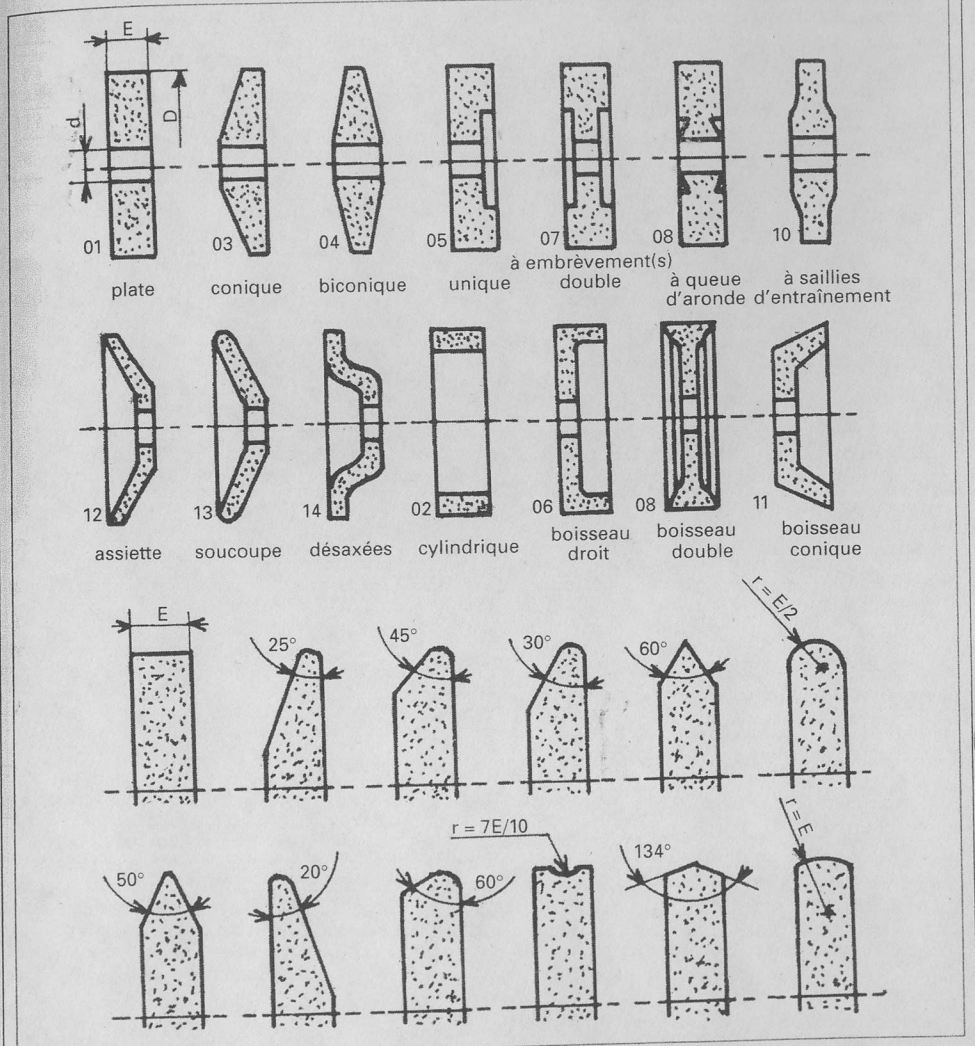


FIGURE 12.7 Principales formes de meules normalisées.

5.2 Dimensions des meules

Elles sont définies dans l'ordre suivant : Diamètre extérieur : D ; épaisseur : E ; diamètre de l'alésage : d.
Ces dimensions peuvent aller de la petite meule (D = 8 mm et E = 0,6 mm) à la grande meule (D = 1 500 mm et E = 500 mm) (fig. 12.8).
Généralement les dimensions les plus courantes sont :

Désignations dans l'ordre
Diamètres extérieur D
8 ; 10 ; 13 ; 16 ; 20 ; 25 ; 32 ; 40 ; 50 ; 63 ; 80 ; 100 ; 125 ; 150 ; 200 ; 250 ; 300 ; 350 ; 400 ; 450 ; 500 ; 600 ; 750 ; 900 ; 1 000 ; 1 250 ; 1 500
Épaisseurs E
0,6 ; 0,8 ; 1 ; 1,25 ; 1,6 ; 2 ; 2,5 ; 3,2 ; 4 ; 5 ; 6 ; 8 ; 10 ; 13 ; 16 ; 20 ; 25 ; 32 ; 40 ; 50 ; 63 ; 80 ; 100 ; 125 ; 160 ; 200 ; 250 ; 315 ; 400 ; 500
Alésages d
1,6 ; 2,5 ; 4 ; 6 ; 10 ; 13 ; 16 ; 20 ; 25 ; 32 ; 40 ; 50,8 ; 76,2 ; 127 ; 152,4 ; 203,2 ; 304,8 ; 508.

FIGURE 12.8 Dimensions courantes des meules recommandées par la normalisation.

Rectification cylindrique d'extérieur

Meules plates (type 1) de 250 à 1 250 mm pour D, de 20 à 125 mm pour E, de 127 à 508 mm pour d.
Meules plates à un embrèvement (type 5) ou deux embrèvements (type 7) de 300 à 900 mm pour D, de 40 à 100 mm pour E, de 127 à 304,8 mm pour d ; les embrèvements R varient de ∅ 190 à 390 mm, avec des profondeurs F et G de 6 à 50 mm.

Rectification cylindrique d'intérieur

Meules plates (type 1) de 6 à 50 mm pour D, de 6 à 40 mm pour E, de 2,5 à 13 mm pour d.
Meules plates à un embrèvement (type 5) de 16 à 50 mm pour D, de 10 à 40 mm pour E, de 6 à 16 mm pour d.

Rectification plane

Meules plates (type 1) de 150 à 750 mm pour D, de 13 à 160 mm pour E, de 32 à 304,8 pour d.
Meules cylindriques (type 2) de 200 à 450 mm pour D, de 100 à 125 mm pour E, de 20 à 40 mm pour B (épaisseur de la couronne).

5.3 Caractéristiques de constitution des meules

Elles sont précisées dans l'ordre ; nature de l'abrasif, grosseur des grains d'abrasif, dureté ou grade de la meule, structure de la meule, nature de l'agglomérant (fig. 12.9).

Nature ou type de l'abrasif

Caractérisée par une lettre (A = Aluminium ; C = Carbures de silicium ; D = Diamant artificiel). Ce sont des minéraux dont les caractéristiques sont leur dureté et leur résistance à la fracture. La lettre peut être précédée d'un numéro (facultatif, au choix du fabricant).
Abrasif céramique. Oxyde d'alumine. Abrasif céramique extrudé avec un rapport longueur/diamètre élevé assurant une structure très ouverte et une répartition régulière des grains (brevet Norton, meules « project ALTOS ») (fig. 12.10 ; 12.11 ; 12.12).

Désignations (dans l'ordre)	Définition
A – C – D	Abrasif
8 - 10 - 12 - 14 - 16 - 20 - 24 30 - 36 - 46 - 56 - 60 70 - 80 - 90 - 100 - 120 - 150 - 180 220 - 240 - 280 - 320 - 400 - 500 - 600	Grain
A à E F à J K à O P à R S à Z	Grade
0 à 3 4 à 6 7 à 14	Structure
V – S – R – RF – B – BF – E – MG – M	Agglomérant

FIGURE 12.9 Caractéristiques de constitution des meules.

FIGURE 12.10 Abrasif céramique extrudé.
«Project Altos» de Norton

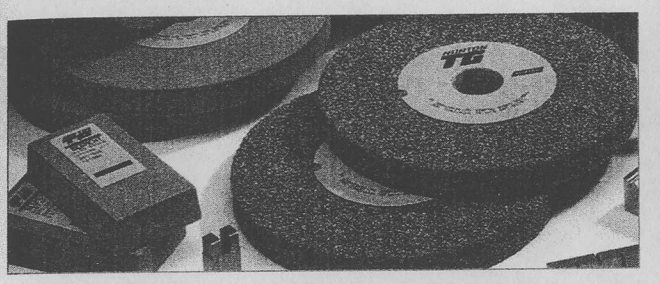


FIGURE 12.11 Meules à abrasif céramique de structures différentes.
Doc. Norton

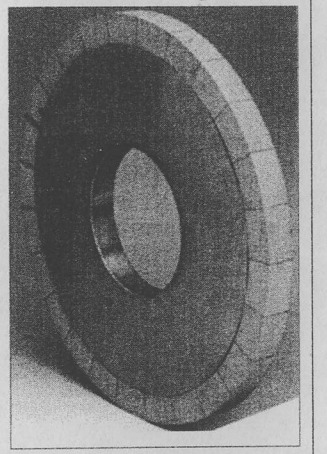


FIGURE 12.12 Meule segmentée à abrasif céramique.
«Project Altos» de Norton

Utilisation. Rectification grande vitesse en plongée droite, contournage, dans la masse avec : grande durée de vie, peu d'élévation de température, retaillage facile.
Abrasif CBN. (Nitrure de Bore Cubique). Abrasif à grains fins, liant vitrifié poreux de grade tendre à dur, structure similaire aux autres meules (fig. 12.13).
Rectification à grande vitesse sans brûlures ni rayures, avec : un excellent état de surface, une grande durée de vie.
Meules plates conçues en anneau ou segments montés sur support en alliage de tous diamètres (meules « Vitrazon » de Unicorn International PLC).
Utilisation. Tous travaux de rectification en série, profilage, passes profondes, dans la plupart des matériaux.

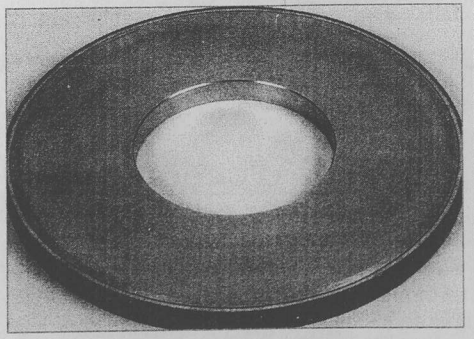


FIGURE 12.13 Meule à abrasif CBN
Doc. Toyoda

Grosseur des grains d'abrasif

Définie par un nombre, du plus gros grain (8), au plus fin (600). De 8 à 220, le nombre correspond au nombre de grains jointifs au pouce (25,4 mm) ; de 240 à 600, le nombre correspond à une sélection par lévigation (séparation par l'eau).
Les grains sont dits : gros, de 8 à 24 ; moyens, de 30 à 80 ; fins, de 90 à 180 ; très fins, de 220 à 320 ; en poudre, de 400 à 600.

Dureté ou grade d'une meule

Désignée par une lettre (A à Z) de la plus tendre (A) à la plus dure (Z).
Les différents grades sont : très tendre (A à E) ; tendre (F à J) ; moyen (K à O) ; dur (P à R), très dur (S à Z).
Le grade caractérise la force de maintien des grains d'abrasif par l'agglomérant utilisé.

Structure d'une meule

Définie par un nombre (0 à 14) ; plus le nombre est grand, plus les grains d'abrasif sont espacés (fig. 12.14).
La structure est dite dense (0 à 3, les grains sont serrés), normale (4 à 6), ouverte (7 à 14, les grains sont écartés). En rectification, c'est la structure dite normale qui est la plus employée.

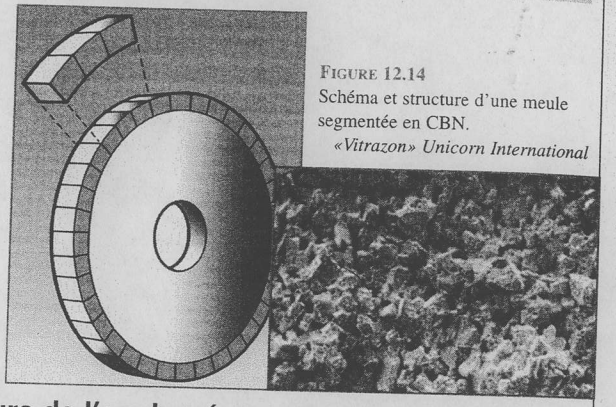


FIGURE 12.14
Schéma et structure d'une meule segmentée en CBN.
«Vitrazon» Unicorn International

Nature de l'agglomérant

Indiquée par une ou deux lettres : V = Vitrifiée ; S = Silicate ; R = Caoutchouc ; RF = caoutchouc avec armature ; B = Résinoïde (résine synthétique) : BF = Résine synthétique avec armature ; E = Gomme laque ; MG = Magnésie ; M = Métallique (cuivre).
L'indication de la structure qui caractérise l'espacement des grains d'abrasif est facultative.
Une spécification supplémentaire, caractérisée par un nombre se rapportant à l'agglomérant, facultative, est une référence de fabricant.

6. Mode d'action de l'outil-meule

Il est lié aux mouvements de la meule et de la pièce provoquant l'opposition des mouvements au contact outil – surface travaillée.
Rotations de la meule et de la pièce dans le même sens en rectification cylindrique d'extérieur.
Rotation de la meule et de la pièce en sens opposés en rectification cylindrique d'intérieur.
Rotation de la meule et translation de la pièce en opposition des mouvements en rectification plane.

6.1 Dureté relative ou dureté d'action

Elle permet d'ajuster les conditions de travail d'une meule (qualité de l'état de surface, débit...)
En supposant un grain d'abrasif en travail en un temps donné *t*, la rotation de la meule entraîne le grain de *a* en *b* et la rotation de la pièce amène le point *a* en *c*, produisant un copeau de section curviligne *a b c* (fig. 12.15).
L'épaisseur du copeau passe par un maximum *c d*.

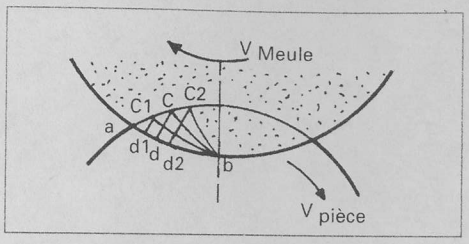


FIGURE 12.15 Variation de l'épaisseur de copeau en fonction des vitesses de meule et pièce.

Meule « dure »

Si la rotation de meule augmente, le point *a* parvient en *b* plus rapidement et arrive en C_1 au lieu de C, provoquant une diminution de l'épaisseur du copeau ($c_1 d_1 < cd$). La meule se comportera comme plus dure, les grains d'abrasif étant soumis à des efforts et un échauffement du liant moins grand.

Meule « tendre »

Si la rotation de meule diminue, elle se comportera comme plus tendre, produisant une augmentation d'épaisseur du copeau ($c_2 d_2 < cd$). Les grains d'abrasif subissent de plus grands efforts, ils s'usent plus vite, le liant s'échauffe plus, libérant des grains.

Vitesse de pièce

Réciproquement, si la vitesse de la pièce augmente dans le même temps *t*, il y a augmentation de l'épaisseur du copeau et la meule se comportera comme étant plus tendre.
Inversement, la diminution de vitesse de la pièce produit un comportement de meule comme étant plus dure.

7. Conditions d'utilisation des meules

Les conditions de travail en rectification sont à ajuster à la mise en œuvre de l'usinage, en fonction des constats observés sur pièces d'essai (aire de contact, dureté d'action, arrosage) pour obtenir un état de surface conforme aux spécifications.
La rectification d'une surface est obtenue par trois mouvements de travail (rotation de la meule, rotation ou translation de la pièce et balayage qui permet à la meule d'explorer toute la surface à rectifier).

7.1 Vitesse de rotation des meules

Donnée en mètres/seconde. Elle varie de 15 à 40 m/s, en fonction : presque essentiellement du procédé de rectification (cylindrique d'extérieur, d'intérieur, plane) ; sensiblement d'après les caractéristiques de constitution des meules.

Vitesses de meule admises, selon les procédés (fig. 12.16) : rectification cylindrique d'extérieur : 30 à 40 m/s ; rectification cylindrique d'intérieur : 25 à 35 m/s ; rectification plane (meule plate) : 15 à 30 m/s ; rectification plane (meule cylindrique boisseau) : 15 à 25 m/s.

Procédés de rectification	Vitesses meule m/s	Vitesses pièces m/min
Cylindrique d'extérieur	30 à 40	20 à 35
Cylindrique d'intérieur	25 à 35	25 à 60
Plane (meule plate)	15 à 30	15 à 30
Plane (meule boisseau)	15 à 25	25 à 80

FIGURE 12.16 Plages de vitesse des meules et des pièces métalliques en rectification.

7.2 Vitesse de rotation ou de translation des pièces

Donnée en mètres/minute. Elle varie de 16 à 60 m/min, en fonction : presque essentiellement des procédés de rectification ; sensiblement d'après les conditions d'usinage (ébauche ou finition) (fig. 12.16).

Vitesses de pièces admises : Rectification cylindrique d'extérieur : 20 à 35 m/min ; rectification cylindrique d'intérieur : 25 à 60 m/min ; rectification plane (meule plate) : 15 à 30 m/min ; rectification plane (meule cylindrique boisseau) : 25 à 80 m/min.

Passes de finition

La vitesse des pièces sera réduite de 20 % environ par rapport à l'ébauche.

7.3 Vitesse de balayage ou largeur de passe

C'est l'avance *f* devant assurer le recouvrement de la surface usinée.
Elle varie en fonction de la largeur de meule et du procédé de rectification.

Valeur de déplacement f. Par tour de pièce en rectification cylindrique ou par cycle aller-retour de meule en rectification plane : 1/2 à 1/10e de la largeur de meule, d'ébauche à finition.

Vitesses de balayage admises : Rectification cylindrique d'extérieur, de E/2 à E/8 (E/3 à E/6 pour les alliages d'aluminium) ; rectification cylindrique d'intérieur, de E/3 à E/6 ; rectification plane avec meule plate, de E/2 à E/10 (E/2 à E/3 pour les alliages d'aluminium) ; rectification plane avec meule cylindrique (boisseau), pas de balayage, on a diamètre de meule ⩾ largeur à rectifier.

7.4 Profondeurs de passe

Par passe en balayage ou par tour de pièce en plongée, elle varie de :
ébauche, de 0,005 à 0,20 mm ;
finition, de 0,002 à 0,04 mm.
Selon les matériaux à usiner, la rigidité du couple pièce/meule, la puissance de la machine, on choisit les profondeurs de passes d'après les données définies en fonction des conditions d'usinage (ébauche et finition) et du procédé de rectification mis en œuvre, soit :

- **Rectification cylindrique d'extérieur.** Pour tous matériaux : ébauche 0,02 à 0,05 mm. Finition 0,01 à 0,005 mm.
- **Rectification cylindrique d'intérieur.** Ébauche : 0,01 à 0,005 mm pour aciers ; 0,02 minimum pour fontes ; 0,05 minimum pour alliages légers. Finition 0,005 à 0,002 pour aciers ; 0,005 minimum pour fontes ; 0,04 pour alliages d'aluminium.
- **Rectification plane avec meule plate.** Pour tous matériaux, ébauche : 0,02 à 0,07 mm ; finition : 0,01 à 0,005 mm.
- **Rectification plane avec meule boisseau.** Ébauche : 0,05 à 0,02 mm pour fontes ; 0,01 à 0,07 mm pour autres matériaux. Finition : 0,02 minimum pour fontes ; 0,01 à 0,07 pour autres matériaux.

7.5 Surépaisseurs de rectification

Elles varient en fonction des dimensions des pièces et du procédé (rectification d'extérieur ou d'intérieur).

Surépaisseurs admises : rectification cylindrique sur diamètres 0,10 à 0,80 mm pour pièces de ∅ 10 mm à ∅ 150 mm (fig. 12.17).

Rectification plane. La surépaisseur d'une surface correspond à la demi-surépaisseur d'extérieur (arbres).

Surépaisseur mm	Diamètres des pièces	
	Extérieurs (arbres) mm	Intérieurs (alésages) mim
0,10 à 0,15	—	D < 10
0,15 à 0,20	D < 10	10 à 18
0,20 à 0,25	10 à 18	18 à 30
0,25 à 0,30	18 à 30	30 à 50
0,30 à 0,40	30 à 50	50 à 75
0,40 à 0,50	50 à 75	75 à 100
0,50 à 0,60	75 à 100	100 à 150
0,60 à 0,80	100 à 150	D > 150
Supérieur à 0,80	D > 150	

FIGURE 12.17 Surépaisseurs de rectification conseillées.

8. Mise en œuvre des meules

8.1 Aire de contact

C'est le produit de l'arc de contact meule/surface travaillée avec la largeur de passe.
Elle a une incidence sur la dureté d'action de la meule.
Vérifier la dureté d'action au début de l'usinage par l'observation de l'état de surface obtenu sur la ou les pièces d'essai.
Les différents défauts observés sur la surface rectifiée permettent de présumer de la cause et de pouvoir y remédier.

Grande aire de contact

La meule risque de s'encrasser avec des grains usés qui ne se fragmentent pas (pression unitaire faible).
Prendre une meule tendre (favorisant l'élimination des grains usés) pour rectifier avec une grande aire de contact.

8.2 Dureté d'action d'une meule

Elle diminue en fonction de plusieurs facteurs : vitesse de meule insuffisante, structure de meule trop ouverte, grains d'abrasif trop gros, diamantage insuffisant (vitesse ou fréquence).

Obtention d'une dureté d'action acceptable

Pour un usinage donné : agir prioritairement sur la vitesse de pièce (la meule se comportera comme plus dure).

Meule trop dure

Elle provoque des facettes et/ou des brûlures sur la surface travaillée causées par des grains usés ne s'arrachant pas suffisamment vite et marquant la surface (fig. 12.18).
Pour remédier à ces défauts, agir sur un ou plusieurs facteurs, soit :
Augmenter la vitesse de pièce, le mouvement de balayage, la profondeur de passe, le débit d'arrosage, la vitesse de diamantage.
Ou diminuer la vitesse de meule, l'aire de contact.

Nota : le maintien de la pièce, l'équilibrage de la meule ou des vibrations parasites peuvent être également des causes de facettes et brûlures.

Meule trop tendre

Elle provoque des arrachements et des rayures discontinues sur la surface travaillée, causés par des grains s'arrachant trop facilement et éventuellement par des micro-copeaux.
Pour remédier à ces défauts, agir sur un ou plusieurs facteurs, soit :
Augmenter la vitesse de meule, le débit d'arrosage.
Ou diminuer la vitesse de la pièce, le mouvement de balayage, la profondeur de passe, la vitesse du diamantage.

Nota : une structure trop fermée peut être également la cause de rayures discontinues et d'arrachements.

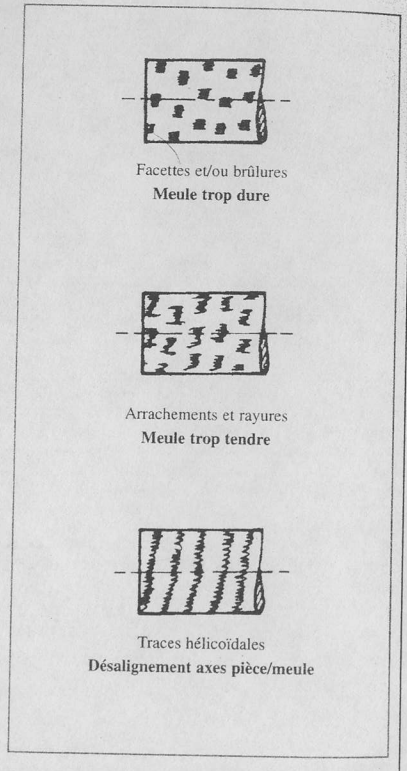


FIGURE 12.18 Défauts de rectification sur les pièces : dureté d'action des meules.

8.3 Traces hélicoïdales

Observées sur la surface travaillée, elles proviendraient d'un désalignement occasionnel des axes pièce – meule : à corriger par des diamantages plus fréquents.

8.4 Choix d'une meule

Pour une rectification donnée, il se fera d'après des données générales relatives à la meule, les ajustements de dureté d'action intervenant ensuite sur les pièces d'essai, sachant que :
En augmentant la dureté d'action d'une meule, l'énergie spécifique d'abrasion augmente d'environ 10 % par grade et l'état de surface est amélioré d'environ 5 % par grade.
Le module d'élasticité d'une meule permet de déterminer précisément la dureté d'action d'une meule, et une échelle de référence donnera la correspondance avec la normalisation numérique de dureté.
On considère les constituants : abrasif, grains, grade, structure, agglomérant.

Abrasif

Selon les matériaux à usiner, on choisira :
Abrasif alumineux. Rectification des aciers, des fontes, du bronze.
Abrasif siliceux. Rectification des alliages légers, du laiton, des carbures métalliques, de la céramique.

Grains

La grosseur des grains sera choisie en fonction de l'usinage à effectuer (ébauche ou finition).
Grains gros. En ébauche pour obtenir un fort débit.
Grains fins. En finition, où le débit est faible.

Grade

Prépondérant dans la dureté d'action des meules, il sera choisi en fonction des caractéristiques du matériau à usiner et de l'utilisation de la meule.
Grade tendre. Rectification des matériaux durs ; grande aire de contact ; obtention d'une finition très précise.
Grade dur. Rectification des matériaux tendres ; petite aire de contact.
Pour utiliser une meule à vitesse réduite, prendre un grade plus dur que normalement.

Structure

Le choix de la structure est fonction du procédé utilisé, puis de l'utilisation de la meule.
Structure moyenne. Rectification cylindrique d'extérieur.
Structure ouverte. Rectification cylindrique d'intérieur ; surfaçage ; ébauche à fort débit ; grande aire de contact.
Structure fermée. Usinage sous fortes contraintes ; finition à faible débit ; petite aire de contact.

Agglomérant

Son choix est fonction de l'utilisation de la meule.
Agglomérant vitrifié. Rectification en général.
Agglomérant résinoïde. Rectification à grande vitesse, avec possibilité de flexion d'outil ; meule de faible épaisseur par rapport au diamètre.

9. Rectification cylindrique d'extérieur et d'intérieur

9.1 Rectification par balayage

À considérer :
Temporisation. En fin de chaque course aller-retour, une temporisation de quelques secondes est à effectuer.
Meule. Un défaut de rectitude de la génératrice de meule est sans incidence sur le profil à réaliser.
Étincelage. Quelques passes sans prise de profondeur, dites d'étincelage, permettront d'obtenir le meilleur état de surface. La meule ne continue d'usiner que quelques microns.
Vitesse de balayage. Influe sur : la qualité de l'état de surface ; la génératrice de la forme usinée ; la dureté d'action de la meule (fig. 12.19).

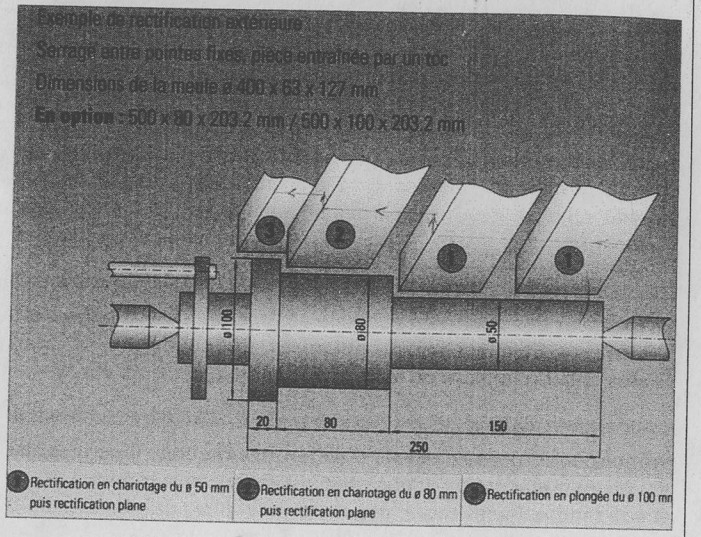


FIGURE 12.19
Opérations de rectification d'extérieur en balayage et plongée en cycles continus.
Doc. Kellenberger Hardinge

Rapport de rectification. Vitesse de meule × 60/vitesse de pièce. Il doit être compris entre 60 et 130, pour obtenir les bonnes conditions de travail.

9.2 Rectification cylindrique d'intérieur

À considérer :
Aire de contact. À limiter par l'utilisation d'une meule d'un diamètre maximum égal à ≅ 3/4 de celui de l'alésage : minimise les contraintes sur l'arbre porte-meule (fig. 12.20).
Meule. Montée en porte-à-faux sur son arbre et recevant un mouvement de rotation élevé (petit diamètre de meule) : l'arbre porte-meule sera le plus rigide possible.

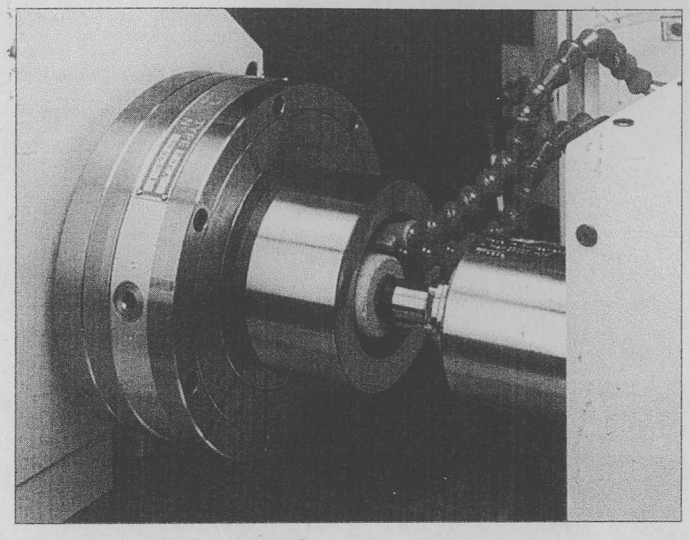


FIGURE 12.20
Opérations de rectification cylindrique d'intérieur.
Doc. Kellenberger Hardinge

9.3 Rectification en plongée

À considérer :
Diamantage. Pour conserver le profil de meule, effectuer de fréquents diamantages : un défaut du profil de meule se reproduirait sur la forme usinée.
Avance. Elle est continue, en plongée.
Grade. Pour éviter un lustrage de la surface usinée, choisir une meule de grade plus tendre qu'en rectification d'extérieur.
Meule. Son épaisseur minimale sera 1/3 de la longueur à rectifier : évite une usure trop rapide de la meule.
Alésage à rectifier. S'il ne débouche pas (borgne ou épaulé), il comportera un dégagement de meule de quelques millimètre en profondeur et en largeur.
Nota : Méthode de rectification rapide, mais l'état de surface est de moindre qualité qu'en balayage.

9.4 Rectification en plongée oblique

Consiste à associer l'avantage de la plongée (rapidité d'usinage) à celui du balayage (cylindricité des profils rectifiés).
Mise en œuvre sur des machines spécifiques, pour travaux de grande série, avec des meules de grand diamètre (fig. 12.21 a et b).
Rapidité d'usinage. Due à l'action simultanée de plusieurs meules équipant la broche porte-outils. S'assurer, à la mise en œuvre d'une série, que les pièces ne fléchissent pas au-delà des tolérances admises sur les diamètres, sous la poussée des meules associées.

Lubrification. Elle sera abondante pour assurer l'évacuation des micro-copeaux et réfrigérer la pièce.
Un manque de lubrification peut altérer la surface de la pièce (accentue la couche de Beilby).

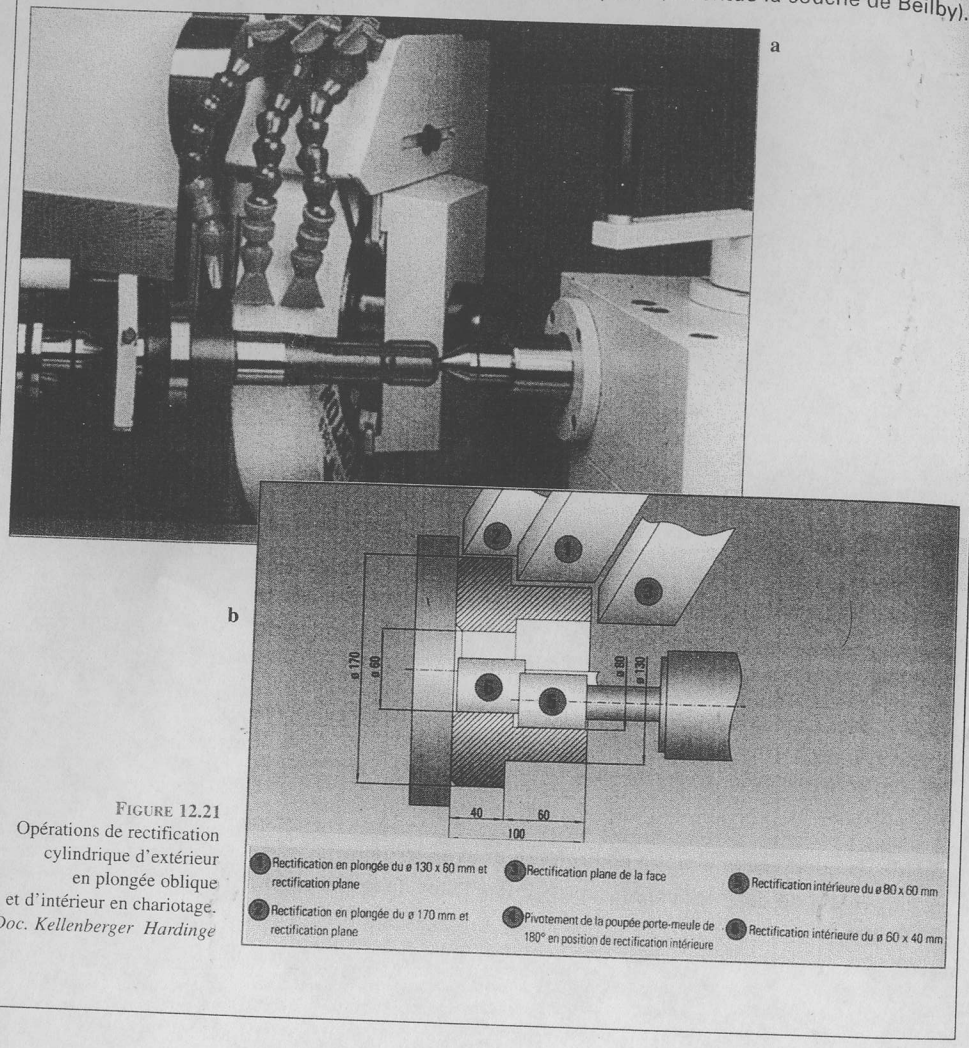


FIGURE 12.21
Opérations de rectification cylindrique d'extérieur en plongée oblique et d'intérieur en chariotage.
Doc. Kellenberger Hardinge

10. Rectification sans centres ou « centerless »

La pièce, libre entre deux meules et sur appui linéique, est entraînée en rotation par la meule de travail et simultanément freinée par la meule de régulation (fig. 12.22).
La pièce tourne en sens inverse de celui de la meule de travail (les vecteurs vitesse, au point de contact, sont de même sens).
Ce procédé permet de rectifier des pièces automatiquement et en continu, en plongée et en enfilade.
Précision de l'usinage (circularité, cylindricité, dimension). Elle dépend essentiellement de la position de la pièce entre les meules.

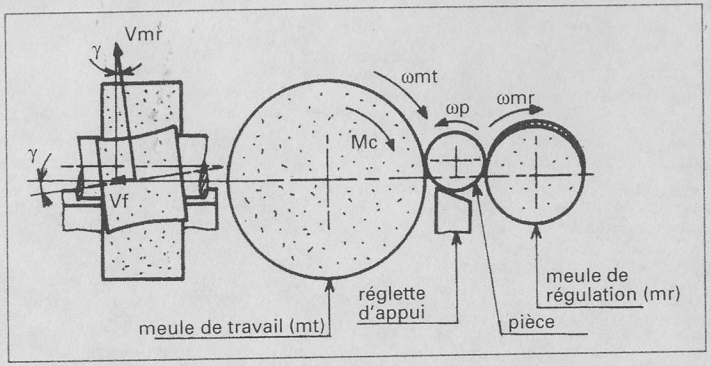


FIGURE 12.22
Schéma de principe de rectification sans centres.

10.1 Meule de régulation

Rectification en plongée. Elle freine le mouvement de rotation de la pièce par pression sur celle-ci, permettant le réglage de la profondeur de passe.
Rectification d'enfilade. Elle provoque le mouvement d'avance de la pièce avec sa position par rapport à la meule de travail (axes dans des plans différents).

10.2 Réglette d'appui de pièce

Elle assure la position de l'axe de pièce devant la meule de travail : conditionne la circularité de la pièce rectifiée.
Son plan d'appui incliné et sa position situent l'axe de la pièce au-dessus des axes de meules : permet d'obtenir la précision de circularité des pièces.
Inclinaison de l'appui. Sur la meule de régulation, ≅ 40 °.
Matériau constitutif de la réglette. Il varie selon les pièces à rectifier : carbure pour métaux durs ; fonte pour métaux tendres ; acier rapide pour alliages non ferreux.
Axe de la pièce. Situer à ≅ 1/5 de son diamètre au-dessus des axes de meules.

10.3 Rectification sans centres en plongée

Rectification en continu de séries de pièces cylindriques courtes, au profil pouvant être quelconque (fig. 12.23).
L'usinage en continu est obtenu par une alimentation automatique.
Meule de régulation. Faiblement inclinée pour assurer le contact de la pièce sur une butée axiale.
Axes des meules. Ils sont parallèles et leurs génératrices sont au profil à obtenir sur la pièce qui est immobile en translation durant l'usinage.

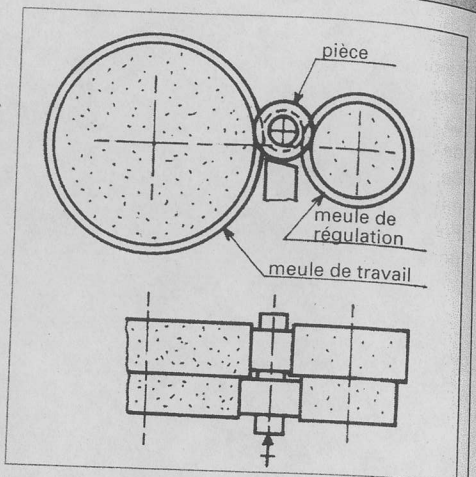


FIGURE 12.23
Schéma de rectification sans centres en plongée.

10.4 Rectification sans centres en enfilade

Rectification en continu de séries de pièces cylindriques ayant un seul diamètre, courtes ou longues.
Les pièces défilent successivement devant les meules. L'usinage au diamètre final s'effectue généralement en une passe (fig. 12.4 b).
Vitesse d'avance. Elle est relativement lente, de 1,5 à 5 m/min : assurer suffisamment de tours de pièces pour obtenir la précision de circularité.
Meule de régulation. Elle est inclinée sur le plan horizontal : produit le mouvement de translation de la pièce (l'avance).
Elle est diamantée suivant un profil hyperbolique : pour son action efficace, du fait de son inclinaison.

10.5 Mise en œuvre

La rectification sans centres nécessite l'usinage de plusieurs pièces de réglage pour corriger d'éventuels défauts de la forme rectifiée, soit :
Non-circularité de la pièce : mauvaise position de l'axe de pièce par rapport aux axes de meules.
Traces hélicoïdales sur la surface rectifiée : pression excessive de la meule de régulation sur la pièce.
Brûlures sur la surface rectifiée : vitesse de translation de la pièce trop faible.
Facettes sur la surface rectifiée : entraînement de pièce mal assuré par un mauvais angle d'inclinaison de la meule de régulation.
Vibration. Proviendrait d'une meule de travail non adaptée au matériau usiné.

11. Rectification en surfaçage

11.1 Avec meule à segments

L'outil-meule est constitué de segments normalisés fixés sur un disque métallique (généralement de diamètres 300 à 600 mm) et reçoit un mouvement d'avance circulaire sur machine spécifique (fig. 12.24).
L'espace entre les segments facilite : l'évacuation des micro-copeaux et des grains usés ; l'action de la lubrification.
Utilisation. Particulièrement en usinage de pièces de petites dimensions maintenues en nombre, par attraction magnétique de la table porte-pièce circulaire.
Peut remplacer le surfaçage par coupe (fraisage) de pièces en alliage d'aluminium, avec finition en qualité rectification.

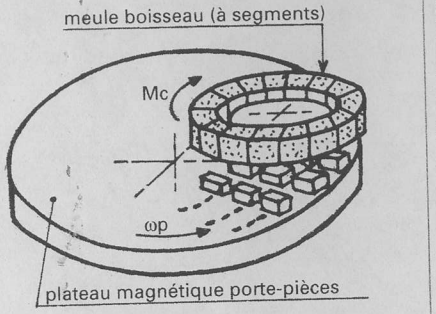


FIGURE 11.24 Schéma de surfaçage avec meule boisseau.

11.2 Avec meule boisseau et meule plate

La meule reçoit un mouvement d'avance rectiligne.
Utilisation : meule boisseau : rectification de surfaces de grande longueur et relativement étroites (glissières de guidage...) ou de petites pièces groupées sur table magnétique (fig. 12.24).
Meule plate. Rectification de plans de toutes dimensions (dans les limites machine) (fig. 12.25).

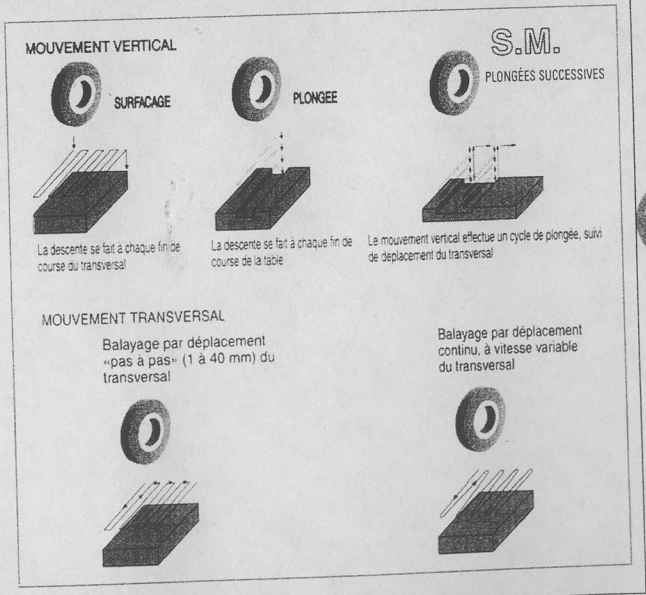


FIGURE 12.25
Cycles de surfaçage en rectification plane.
Doc. LGB Bricaud SA

12

12. Lubrification

Nécessaire en rectification pour refroidir et nettoyer continuellement la meule.
Pour assurer une excellente lubrification, il faut supprimer le phénomène de couche limite par satellisation du liquide d'arrosage autour de la meule, la force centrifuge de la meule tendant à projeter le liquide tangentiellement.
Si le liquide est laminé entre la meule et un patin d'une grande énergie cinétique, les actions de lubrification sont très efficaces.
Liquide d'arrosage. Il est filtré pour son recyclage, afin d'éliminer les boues en suspension, et simultanément refroidi.
Sa propreté a une incidence sur la qualité de l'état de surface obtenu (filtration à 99 % des particules jusqu'à 3 µm) tout en améliorant les conditions de travail.
La haute pression (10 à 20 bars) avec des buses de diffusion, fait traverser par le liquide la couche limite, assurant refroidissement et nettoyage dans la zone de travail.

13. Appareillages

13.1 Les pièces cylindriques longues

Elles sont maintenues entre pointes, sèches ou tournantes, de grande précision.
Les centres de prise de pièce sont préalablement rectifiés ou rodés (en rectification orbitale avec meule conique) pour assurer les précisions géométrique et dimensionnelle (fig. 12.26).

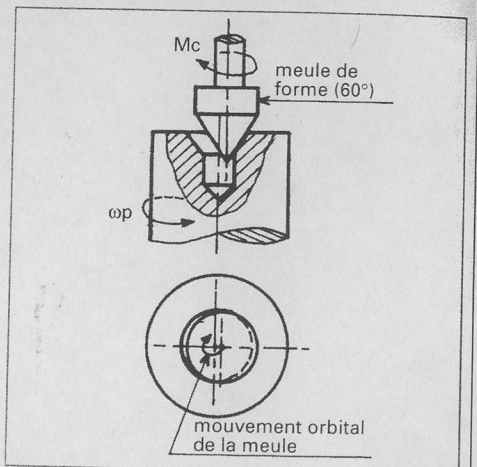


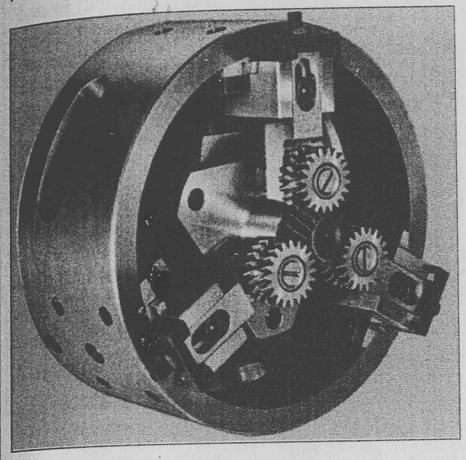
FIGURE 12.26
Schéma de rectification sans centres en plongée.

13.2 Les pièces cylindriques courtes

Elles sont maintenues en pinces, en mandrins de précision à 3,4 ou *n* mors concentriques ou/et indépendants.
Certains mandrins peuvent être à indexage pour la rectification de plusieurs alésages inscrits sur un cercle d'une pièce plate (sans démontage, dans la phase).

13.3 Des montages

La fixation de pièces sur mandrins à 4 ou 6 mors (avec un maximum de modularité) permet la prise de pièces avec précision, en travail de série (fig. 12.27).



a - Mandrin concentrique à 3 mors équipés de satellites pour le serrage au diamètre primitif de la denture d'un pignon.

b - Mandrin à indexage manuel pour le serrage excentrique d'un corps de pompe permettant de rectifier successivement 11 alésages en un seul serrage.

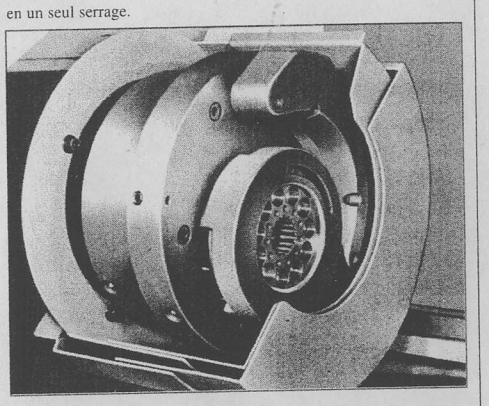


FIGURE 12.27
Mandrins de prise de pièces courtes en rectification.
Doc. Voumard

13.4 Les pièces de types plates et cubiques

Elles sont maintenues sur plateau magnétique, en étau de précision (à mors parallèles ; pivotants, sinus) sur diviseur rotatif à CN (à 1 ou 2 axes de rotation).

14. Machines

Les rectifieuses sont des machines spécifiques à chacun des différents procédés : d'extérieur et/ou d'intérieur, plane, sans centres, de profils particuliers.
Elles sont généralement à commande numérique de haute résolution (1 ou 0,1 µm) avec des conceptions leur permettant, selon l'automatisation et le type de machines :

Finition de grande précision.
Rectification d'ébauche dans la masse.
Rectification de plusieurs faces et d'alésages automatiquement dans une même phase sans démontage de la pièce (conditions de concentricité et de perpendicularité assurées avec une très grande précision).
Production en travaux unitaires comme de série.
Intégration dans une unité de production automatisée.
Rectification, en synchrone, d'extérieur et d'intérieur.
Flexibilité, avec identification de chaque pièce et pilotage d'un robot d'alimentation intégré.
Rectification de pièce de forme complexe, avec : interpolation linéaire et circulaire ; programmes de diamantage ; correction de rayon quel que soit l'angle d'inclinaison de la meule (plongée oblique...).
Compensation automatique de l'usure de meule.
Jauge d'autocalibrage (à contact, à commande BCD, à générations d'impulsions) faisant réagir la CN immédiatement aux signaux reçus : comparaison cote mesurée avec cote à obtenir, jusqu'à l'obtention de la précision désirée, avec dégagement de la meule (fig. 12.28).

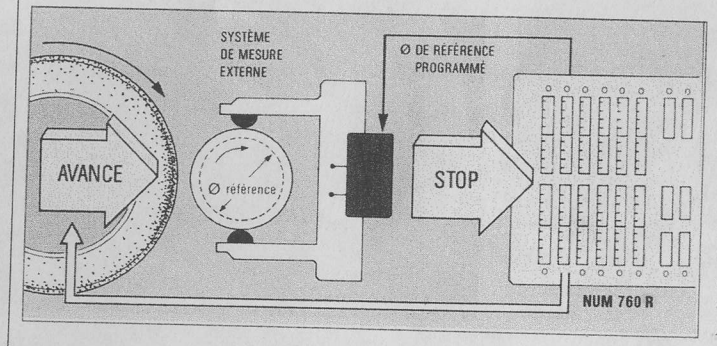


FIGURE 12.28
Schéma de principe d'autocalibrage dimensionnel en rectification.
Doc. NUM SA

Programmation, conçue à partir du métier, avec : cycles répétitifs de rectification (fig. 12.29) et de dressage-diamantage, sous-programmes, menus utilisables individuellement ou combinés, dialogue (introduction précisions dimensionnelle et état de surface, surépaisseur...) pour usinage unitaire à la série, en ébauche et finition, dans la phase en continuité de cycles.

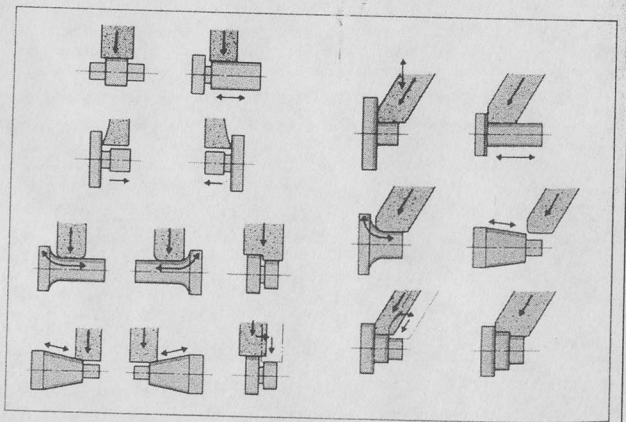


FIGURE 12.29
Schéma de cycles de rectification d'extérieur avec MOCN
Doc. Grundin Toyoda

Système de mesure du diamètre de meule commandant la vitesse constante de meule (fig. 12.30).
Résolution incrémentale de l'avance pouvant être différente pour chaque cas et dans la succession des opérations de rectification (ébauche, diamantage).
Rectification à avance lente pour usinage en passe profonde (identique au fraisage), puis à avances de rectification.

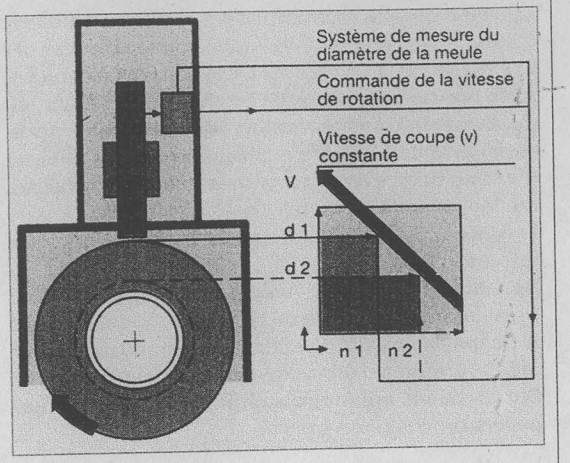


FIGURE 12.30
Schéma de principe de commande vitesse constante de meule sur rectifieuse plane.
Doc. G + H Gobel et Hotz

14.1 Rectifieuses planes

Principalement conçues à table porte-pièces rectangulaire, la broche porte-meule étant horizontale (pour meule plate) ou verticale (pour meule boisseau) (fig. 12.31).
Les machines à broche horizontale sont les plus utilisées.
Leurs capacités peuvent être importantes (plusieurs mètres de longueur de table jusqu'à un mètre de large).
L'avance lente permet l'ébauche en une passe profonde (identique au fraisage) dans des matériaux très durs, avec finition en passe rapide et en pendulaire.
Avec dresseur de meule à CN : réalisation de profils linéaires complexes ; diamantage avec compensation automatique d'usure de meule intégrée dans le cycle de rectification.
Utilisation. Obtention de pièces d'outillage, en plongée et à avance lente, directement dans des ébauches trempées.

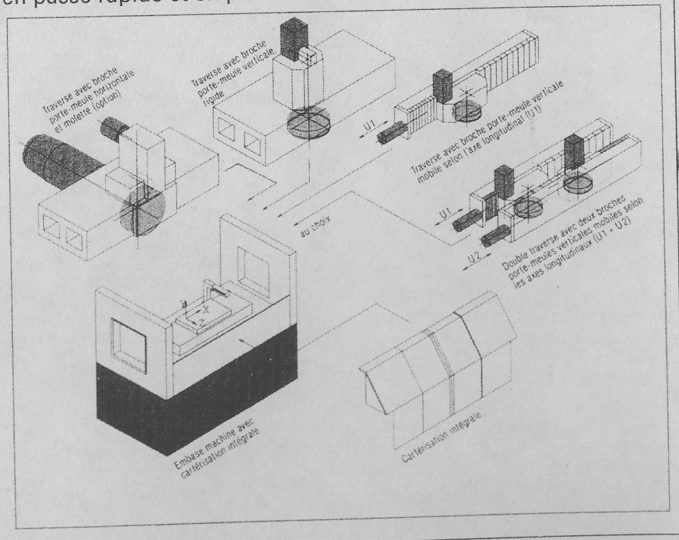


FIGURE 12.31
Schéma de conception modulaire de rectifieuses planes.
Doc. Mägerle

14.2 Rectifieuses cylindriques

Conçues pour la rectification : d'extérieur ou d'intérieur ou mixte (machine de rectification d'extérieur avec une unité mobile de rectification d'intérieur).
Ces machines à CN peuvent être conçues à deux broches avec 3 à 6 axes numérisés.
Avec broche hydrostatique montée sur un arbre télescopique, rectification d'alésages longs, de diverses profondeurs avec un minimum de porte-à-faux.
Avec plongée oblique : rectification de plusieurs surfaces en une seule plongée (jusqu'à 45° d'orientation) avec une grande plage de vitesses de plongée (de quelques centièmes à quelques mètres/minute).
Précision. Cylindricité et concentricité de quelques microns en rectification entre pointes (pièces longues).
Rectification conique. Avec précision par pivotement automatique de l'unité porte-meule (résolution au millième de degré).
Avec meule en CBN. Rectification à grande vitesse (100 à 200 m/s) : augmente la productivité; réduit le temps d'étincelage et les tensions superficielles de la surface rectifiée.
Sur certaines rectifieuses, équilibrage automatique de meule et régulation thermique des paliers broche porte-meule.

14.3 Rectifieuses sans centres

Très utilisées dans l'industrie : grande productivité; précision obtenue automatiquement (avance impulsionnelle jusqu'à 0,25 µm).
L'alimentation, en enfilade et en plongée, est rapide, la pièce n'étant pas maintenue.
Des pièces cylindriques de petits diamètres et devant être géométriquement très précises sont usinées directement dans la barre (en plusieurs opérations éventuellement).
En plongée, précision continue assurée avec : compensation d'erreur de diamètre (usure de meule, variation thermique), cycles automatiques, jauge de mesure.
Conicité réglée automatiquement avec deux jauges de mesure provoquant le diamantage de meule et, à défaut, le pivotement de la semelle d'orientation.
Utilisation. Production entièrement automatique avec : alimentation, contrôle diamétral, diamantage-taillage du profil de meule, compensation d'erreurs.

Rectification d'intérieur sans centres

Possible pour des pièces de grand diamètre et de faible largeur, type bague.
La pièce est maintenue entre deux galets et la meule de régulation (fig. 12.32).

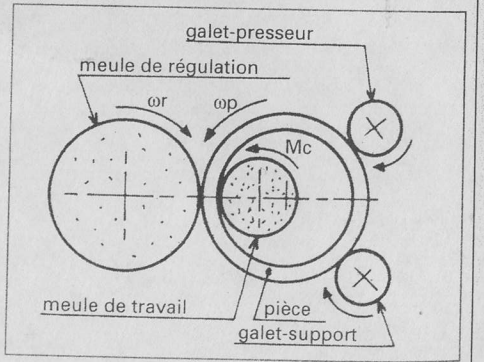


FIGURE 12.32
Schéma de principe de rectification d'intérieur sans centres.

14.4 Rectifieuses de forme

Généralement à CN, conçues très spécifiquement pour usinage de profils donnés (cames sur arbre à cames, profils « polygon », cylindres de laminoirs...).

Rectifieuses des profils « polygon »

Combinaison de deux mouvements synchronisés, la rotation uniforme de la pièce avec le déplacement périodique de la meule (outre sa rotation) produisant un mouvement elliptique (fig. 12.33).
Déplacement de la meule. Obtenu par deux mouvements (horizontal et vertical).
Le mouvement horizontal est réglable pour obtenir l'excentricité désirée.
Le mouvement vertical permet l'attaque de la pièce par la meule suivant une verticalité, éliminant l'influence du diamètre.
La pièce tourne à une vitesse angulaire constante et la meule reste au contact de la pièce suivant la normale instantanée à la courbe polygonale.
Le mouvement de l'axe de la meule décrit une trajectoire elliptique.
Utilisation. Rectification de profils « polygon » d'extérieur sur cylindre et cône.
Rectification de profils intérieurs de grands diamètres (le diamètre de la meule devant correspondre au diamètre de raccordement des arches de cycloïde).

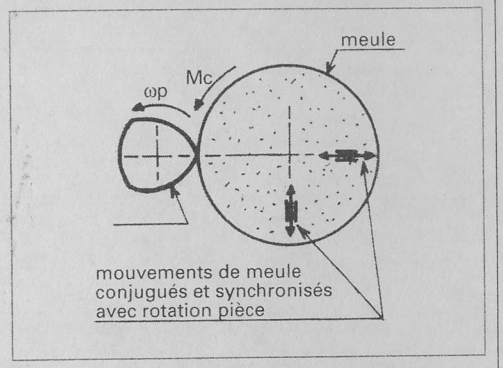
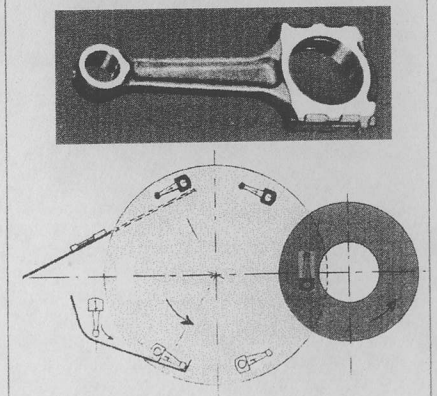


FIGURE 12.33 Schéma de principe de rectification polygon.

Rectifieuses de surfaçage d'un type de pièces

Machines conçues pour la très grande série, avec alimentation automatique.
Exemple de surfaçage des faces de bielles, en ébauche et finition, simultanément sur les deux faces, avec plateau porte-pièces circulaire et deux meules travaillant simultanément sur les faces opposées des pièces (fig. 12.34).

Nota : La rectification de dentures (engrenages et arbres cannelés) est étudiée au chapitre « Procédés de taillage ».
La rectification de filetages est étudiée au chapitre « Procédés de filetage ».



■ **OPÉRATIONS A RÉALISER :**
- Surfaçage des faces en ébauche en finition

■ **CONDITIONS DE RECTIFICATION :**
- Prise de pièce en "barillet" rotatif

FIGURE 12.34
Schéma d'une station de rectification plane en continu.
Doc. Gendron

Rectifieuses d'arbres à cames

Machines à cinq axes numérisés avec synchronisation de la rotation de pièce et de la translation de meule.
Avec meule en CBN de petit diamètre, rectification dans des matériaux durs, de formes convexes et concaves.
La programmation est automatique (avec cycles et conditions de rectification intégrée) à partir de l'introduction de la levée de came dans la CN (fig. 12.35).
L'ensemble des cames d'un arbre étant mémorisé dans la CN, toute la rectification est automatique.

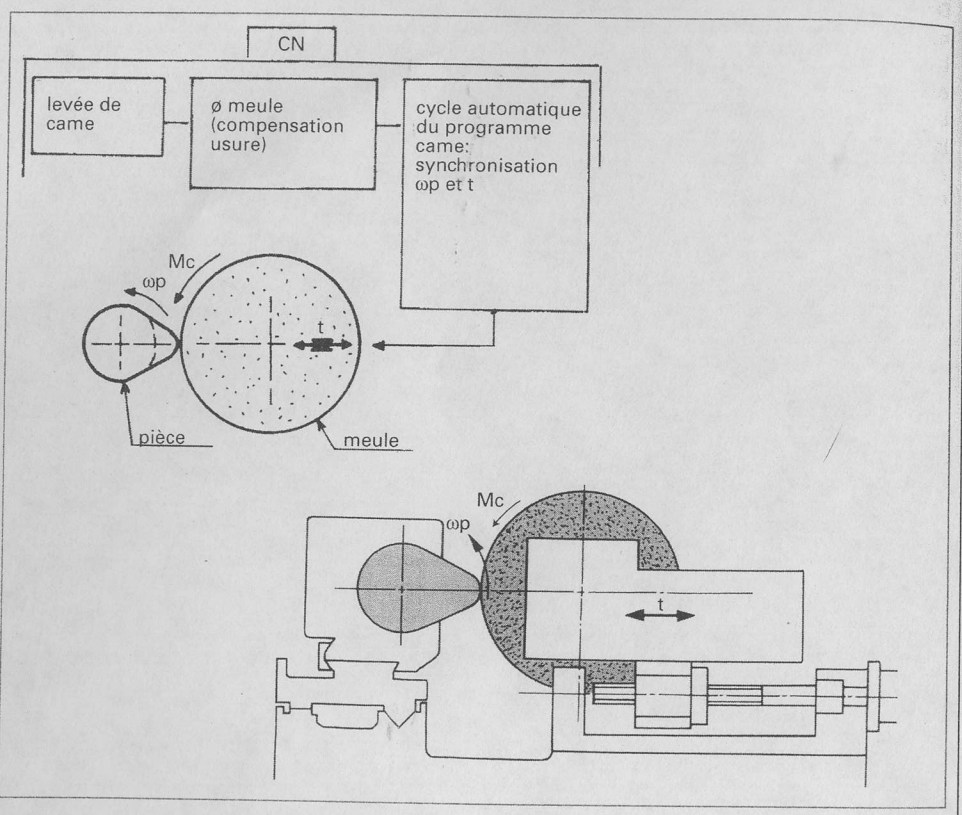


FIGURE 12.35 Schéma de principe de rectification de cames. *Doc. Toyoda*

Rectifieuses par coordonnées

Machines à CN, pour rectification de pièces plates de forme complexe avec précision de quelques µm : matrices et poinçons, avec un seul programme par fonction miroir... (fig. 12.36).
Un palpeur de contrôle électronique, s'adaptant sur la broche, permet la vérification de l'usinage sur la machine.

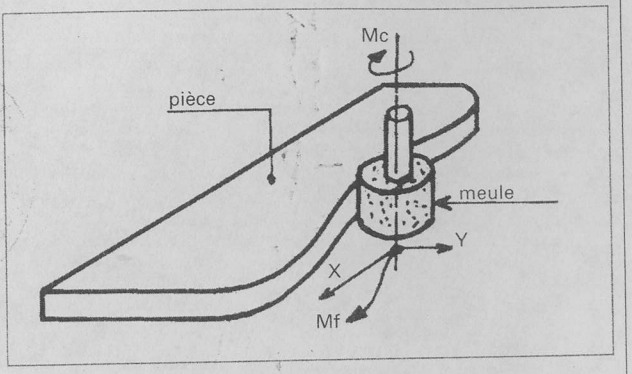


FIGURE 12.36 Schéma de principe de rectification par coordonnées XY.

Rectifieuses d'un profil donné

La meule, de type plate, a son profil taillé à la forme à obtenir.
Pour maintenir le profil le plus longtemps possible entre deux retaillages, la meule est de très grand diamètre (500 à 1 000 mm).
La prise de passe s'effectue en plongée de meule.

Rectifieuses planétaires

La meule, de type cylindrique et de petit diamètre, est animée, outre son mouvement de rotation, de mouvements planétaire et rectiligne-alternatif, la pièce étant fixe (fig. 12.37).
Utilisation. Rectification de grands alésages dans des pièces plates (peu épaisses).

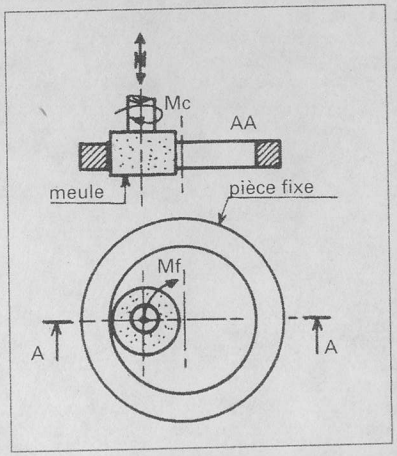


FIGURE 12.37 Schéma de principe de rectification planétaire.

13 PROCÉDÉS DE SUPERFINITION

1. Généralités 421
   1.1 Le procédé de galetage 421
   1.2 Le procédé de rodage 421
   1.3 Le procédé de polissage 421
2. Procédés de galetage 421
   2.1 Généralités 421
   2.2 Galetage de précision en état de surface 423
   2.3 Galetage de précision dimensionnelle 424
   2.4 Galetage de renforcement 424
   2.5 Mise en œuvre 425
3. Procédés de rodage 428
   3.1 Généralités 428
   3.2 Outils abrasifs 429
   3.3 Lubrification 430
   3.4 Surépaisseur de rodage 431
   3.5 Rodage d'intérieur (alésages) 431
   3.6 Rodage d'extérieur de pièces cylindriques 433
   3.7 Rodage d'extérieur des pièces plates 433
   3.8 Rodage avec poudre abrasive 434
4. Procédés de polissage 434
   4.1 Généralités 434
   4.2 Outils abrasifs 434
   4.3 Mouvements de génération 435
   4.4 Machines 435
   4.5 Utilisation 436

1. Généralités

Production d'un excellent état de surface améliorant en particulier la portance des pièces usinées.
Les différents procédés de superfinition sont le galetage, le rodage, le polissage.

1.1 Le procédé de galetage

Améliore l'état de surface et produit une excellente portance avec amélioration des caractéristiques mécaniques par fluage de la matière en superficie.

1.2 Le procédé de rodage

Améliore l'état de surface avec essentiellement un excellent état de surface par usure de la matière inerte en surface après usinage par coupe.

1.3 Le procédé de polissage

Améliore l'état de surface avec une excellente planéité jusqu'au fini spéculaire.

2. Procédés de galetage

2.1 Généralités

Superfinition de surfaces fonctionnelles cylindriques sous l'action de galets déformant à froid la surface enveloppe des pièces (d'intérieur et d'extérieur) par pression, faisant fluer la matière en surface.
Procédé économique de superfinition des surfaces : les galets, en acier traité, ne s'usant pas.

Qualités obtenues

Le galetage améliore l'état de surface (fig. 13.1), la portance, la dureté, la résistance à l'usure et la résistance à la rupture, réalisant des surfaces polies, avec précision dimensionnelle et orientation des fibres.

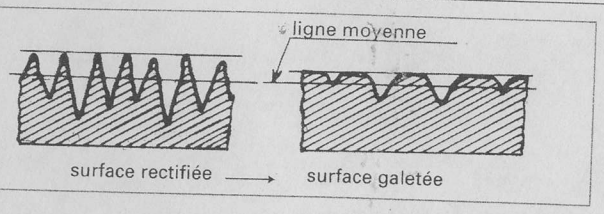


FIGURE 13.1
État de surface obtenu en galetage.

État de surface. 0,8 à 0,05 Ra.
Plus la **pression exercée** sera grande et plus l'état de surface obtenu se rapprochera de la ligne moyenne.
Les sommets sont écrêtés et les creux relevés par rapport à la ligne moyenne.
Le métal refoulé flue sous la pression exercée par le galet qui déforme, plastifie et polit la surface dans son action de travail, sans provoquer de criques dans la pièce (fig. 13.2).

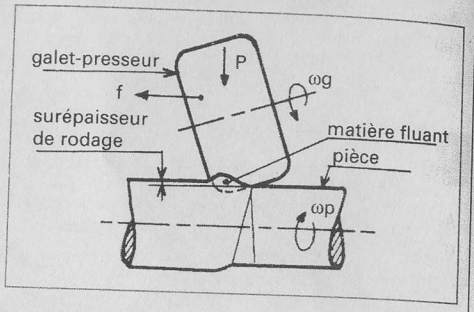


FIGURE 13.2
Schéma de mode d'action du galet-presseur.

Résistance à la fatigue. Elle augmente considérablement jusqu'à environ 3 mm minimum de profondeur.
Les effets d'entaille, cause d'amorçage de criques, n'existent pas.
Surface galetée. Engendre un faible frottement, favorable aux portées étanches (joints...) sur pièces tournantes, la portance étant excellente.
Dureté de galetage. Décroît, presque régulièrement, jusqu'à la dureté initiale de la pièce. Elle augmente de 5 à 10 % sur une profondeur de 0,25 à 0,80 mm.
Nota : Un allongement de matière continu est à considérer, en conception et méthode pour chaque cas de pièce à galeter.

Différents galetages

Selon le type de qualité recherché, la phase de galetage sera : de renforcement, de précision en état de surface, de précision dimensionnelle de la forme galetée.

Procédé d'usinage précédant le galetage

Par coupe ou abrasion, il n'a pratiquement pas d'effet sur l'état de surface galeté.
Une rugosité relativement grande est préférable (≅ 1,6 Ra mini).
Quel que soit le procédé employé, la surépaisseur de galetage est à prévoir ainsi que la précision d'état de surface à obtenir.

Conditions d'usinage

Elles sont rapides : mouvement de rotation de la pièce de 100 à 200 m/min ; mouvement d'avance des galets de 5 mm/tour.

2.2 Galetage de précision en état de surface

Il s'effectue à l'aide d'un galet-presseur (cylindrique) et de deux galets-supports qui exercent une pression sur la surface à galeter.
La pièce reçoit un mouvement de rotation entraînant l'outil également en rotation et qui reçoit le mouvement d'avance (fig. 13.3).

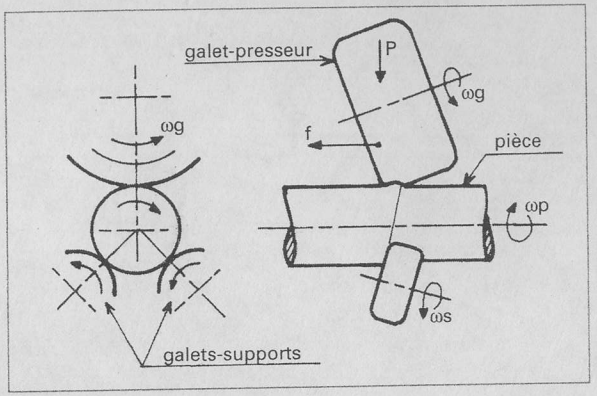


FIGURE 13.3
Schéma de principe du galetage de précision en état de surface.

Le galet-presseur, **incliné sur la génératrice du cylindre, donne l'angle d'attaque de l'outil sur** la surface.
L'inclinaison de l'ensemble des galets par rapport à l'axe de la pièce provoque une auto-avance, et contribue à l'obtention d'un état de surface de qualité.

Surépaisseur de galetage

De 15 à 20 µm pour les surfaces obtenues par coupe.
De 3 à 5 µm pour les surfaces obtenues par rectification.

Qualité recherchée

État de surface (Ra maxi 0,05 µm) avec une amélioration de précision macro et micro-géométrique (fig. 13.4).

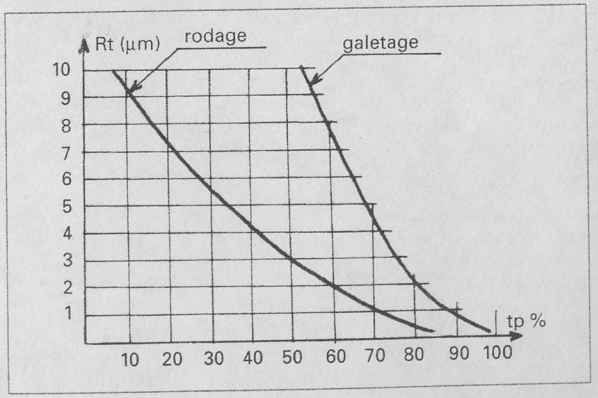


FIGURE 13.4
Taux de portance comparé galetage-rodage.

2.3 Galetage de précision dimensionnelle

Il s'effectue essentiellement sur des formes courtes (portées de roulements...).
Le galet-presseur, cylindrique aux extrémités arrondies, porte en totalité sur la surface à galeter, les galets-supports pouvant être décalés de cette surface (fig. 13.5).

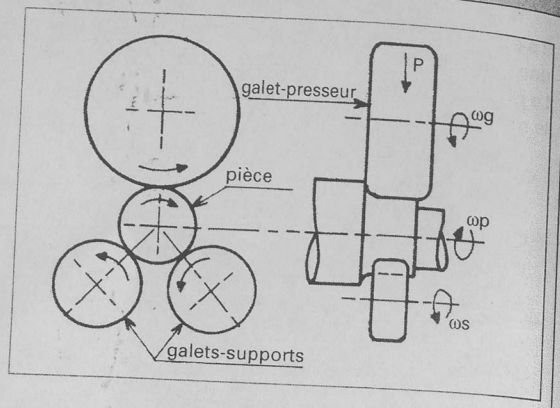


FIGURE 13.5
Schéma de principe du galetage de précision dimensionnelle.

Surépaisseur de galetage

De 0,10 à 0,15 mm.

Qualités recherchées

Dimensionnelle et augmentation de la portance.
Dimensionnelle : maximum de 10 µm, à cause de l'élasticité du matériau, en particulier, qualité 5, à partir d'une qualité initiale grossière (9 ou 10).
État de surface. Ra maxi 0,5 µm, à partir d'une rugosité initiale qualité 8 à 9.

2.4 Galetage de renforcement

Il s'effectue essentiellement sur des zones localisées de pièces où le taux de fatigue est important (congés de raccordement ayant à supporter de fortes charges), avec le galet-presseur de forme arrondie et orientée à 45° (fig. 13.6).

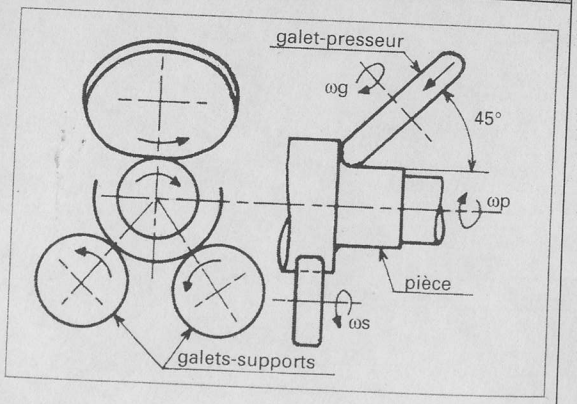


FIGURE 13.6
Schéma de principe du galetage de renforcement.

Les valeurs de renforcement optimales et uniformes sont obtenues à l'aide de pressions contrôlées dans le temps de galetage.
Les contraintes de compression obtenues avec ce procédé s'opposent aux contraintes de traction et de flexion.

Surépaisseur de galetage

De 0,15 à 0,30 mm selon les dimensions des pièces.

Qualité recherchée

Endurance de la pièce par un traitement moléculaire de la matière en orientant les fibres.
Augmentation considérable de la résistance à la fatigue (300 %).

2.5 Mise en œuvre

En production de grande série (automobiles, hydraulique...) : réalisation rapide pour une portance supérieure aux autres procédés.
Le galetage peut s'effectuer suivant plusieurs méthodes, avec pièce maintenue ou pièce guidée.

Galetage pièce maintenue

Il varie suivant la longueur à galeter, soit :
En chariotage. Pour surfaces longues (la pièce étant maintenue aux deux extrémités) avec un ou plusieurs galets-presseurs (fig. 13.7).
Les machines produisent l'avance des galets, mécaniquement ou hydrauliquement.

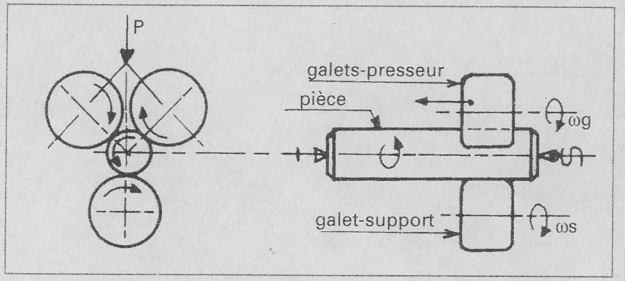


FIGURE 13.7
Schéma de principe de galetage en chariotage.

En plongée. Pour surfaces courtes, de longueur à galeter ≤ largeur des galets.
Les galets sont parallèles aux génératrices de la surface (pas de mouvement d'avance).

Galetage pièce guidée

Trois galets, en position triangulée, maintiennent la pièce centrée.
Un des galets, étant moteur, assure les mouvements de rotation et d'avance (par adhérence) de la pièce.
La disposition inclinée et en quinconce des galets permet d'obtenir une avance continue de quelques mètres/min (fig. 13.8).
Le galetage s'effectue en enfilade ou en plongée.

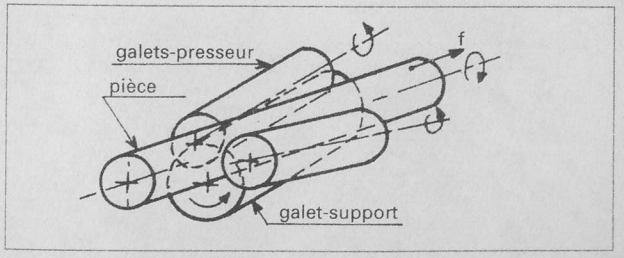


FIGURE 13.8
Schéma de principe de galetage pièce guidée en enfilade.

Pression de galetage

Elle varie en fonction : des diamètres galet-presseur et pièce avec leur longueur de contact ; de la pression spécifique du matériau-pièce.

Matériaux à galeter

Ils auront un allongement à la rupture de 6 % et jusqu'à 10 % pour le galetage dimensionnel.
La fonte et les matériaux frittés, de structure poreuse, conviennent bien au galetage.
Les aciers cémentés ne doivent pas être galetés (risque de décollement de la couche cémentée).

Surfaces courtes

Galetage en plongée. Usinage préalable avec chanfrein d'entrée et gorge de dégagement (sous-dimensionnée de quelques dixièmes de mm afin d'absorber l'allongement de matière).
Les surfaces cylindriques plates peuvent être galetées avec des galets situés en opposition sur les deux faces opposées (fig. 13.9).

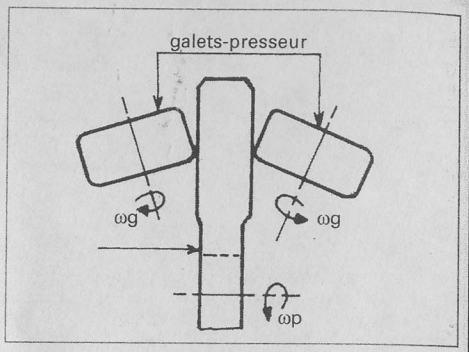


FIGURE 13.9
Schéma de galetage de faces sur pièce cylindrique plate.

Surfaces cylindriques d'intérieur (alésages)

Peuvent être galetées à l'aide de mandrins porte-galets, avec expansion des galets de 0,5 à 1 mm selon les diamètres d'outils (fig. 13.10).
L'usinage préalable est généralement l'alésage (coupe) avec la même précision que pour le galetage d'extérieur.
Possibilité de perçage, étirage de précision, rodage d'ébauche éventuellement.
La surépaisseur d'usinage est fonction en particulier du diamètre de l'alésage, de 0,01 à 0,08 mm.
La qualité 6 est obtenue à partir de l'ébauche en qualité 8 ou 9.
Les défauts macrogéométriques dans l'alésage sont réduits d'environ 25 %.

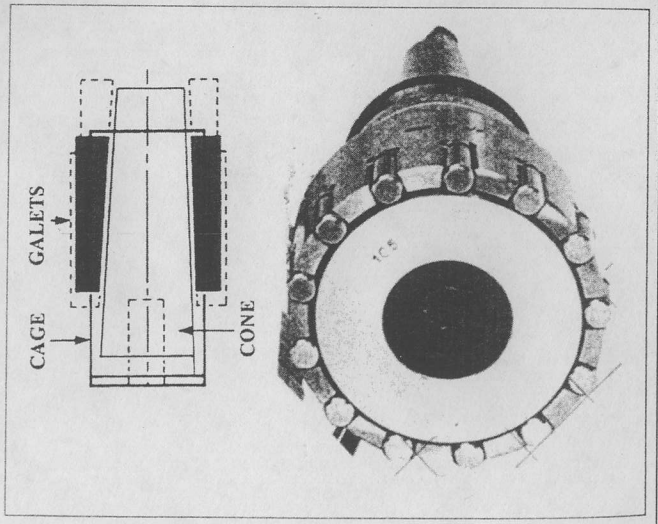


FIGURE14.10 Mandrin de galetage d'intérieur.
Doc. Cogsdill - Numeaton Ltd., SET dustributeur

Le mandrin porte-galets reçoit le mouvement de rotation (100 à 200 m/min) et le mouvement d'avance (0,5 à 4 mm/tour, en général).
Utilisation : En particulier, production de pièces hydrauliques et pneumatiques (vérins) : précision, rapidité d'obtention.
Le coefficient de frottement des alésages galetés permet une réduction importante de l'usure des joints associés aux alésages (la surface galetée ne présente pas de pics).
Forme discontinue. Ne pas dépasser 15 % de la périphérie de l'alésage ou utiliser un outil à grand nombre de galets (répartition des pressions).

Pièces tubulaires

La déformation étant élastique, un phénomène de retour nécessite de galeter à un diamètre supérieur de 0,03 à 0,05 mm pour compenser cet effet.

Outil combiné d'alésage-galetage

Les opérations d'usinage dans les tubes, alésage et galetage, peuvent s'effectuer en une seule opération.
L'opération d'alésage, en cycle automatique, s'effectue à la course aller de l'outil combiné, avec rétraction des lames de coupe en fin de course.
L'opération de galetage se réalise en course retour d'outil, avec prise de passe préalable (les galets étant rétractés durant l'alésage) (fig. 13.11).

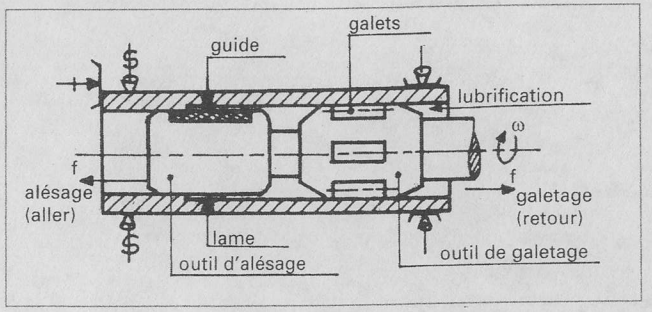


FIGURE14.11 Schéma d'outil combiné calibrage - galetage d'intérieur.

La tête d'alésage comporte deux lames opposées, guidées par des patins : généralement, son avance est importante (quelques mm/tour) la profondeur de passe étant faible (quelques dixièmes de mm) : lames de coupe avec un angle de direction d'arête Kr faible.
La précision recherchée est de qualité 7 avec Ra 0,8 µm.
Une forte lubrification sous pression est nécessaire : lubrification et réfrigération de l'outil ; élimination des copeaux de la surface alésée.
Conditions d'usinage : Identiques à des valeurs d'alésage (coupe) et du galetage : 70 à 170 m/min en rotation ; 1 à 7 mm/tour en translation.
L'inclinaison des galets par rapport à l'axe du porte-outil favorise l'avance programmée (supérieure à l'avancement naturel des galets inclinés) : suffisance d'une faible force de traction des galets (400 à 800 daN, selon les diamètres usinés).

3. Procédés de rodage

3.1 Généralités

Superfinition de surfaces fonctionnelles par déplacement rapide et discontinu de pierres abrasives maintenues en pression contre la surface à roder, sous forte lubrification enlevant une faible quantité de matière par frottement et abrasion (fig. 13.12).

L'outil abrasif (pierre ou poudre) érode la surface usinée, supprimant la couche de métal amorphe (couche de Beilby, aspérités de coupe) sans arrachement de matière ni échauffement superficiel.

Surfaces rodées

Avec des méthodes différentes : cylindriques d'intérieur (les alésages, débouchants ou borgnes) ; planes, coniques, cylindriques d'extérieur.

Opération d'usinage rapide, produisant des surfaces d'excellente précision, avec une mise en position de la pièce généralement peu précise.

Qualités obtenues

Le rodage améliore les qualités fonctionnelles des pièces en mouvement (état de surface, géométrie, dimension) et leur usure par la suppression des défauts superficiels subsistant sur les surfaces après usinage.

État de surface. Inférieur au micron.

Dimension, circularité, cylindricité. Quelques microns.

Matériaux à galeter

La plupart des métaux peuvent être rodés et particulièrement les aciers (trempés ou non), les fontes, le carbure, les métaux non ferreux.

Procédé d'usinage précédent

En général, par coupe.

Le rodage s'effectue généralement en dernière phase de fabrication.

En production de grande série il peut être réalisé en plusieurs opérations (ébauche, demi-finition, finition) avec une autre phase intermédiaire (traitement thermique, nettoyage...).

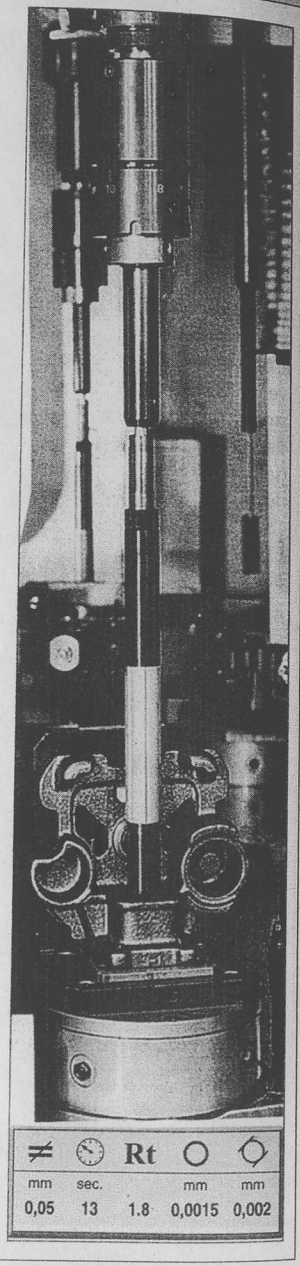


FIGURE 13.12
Opération de rodage avec rodoir monobloc sur machine à CN Prohone PRH 18/16.
Doc. Guiliani

Utilisation

Production de grande série (automobile, hydraulique, pneumatique...).
Petits alésages. Remplace avantageusement la rectification (usure et flexion des meules de petit diamètre, d'où risque de conicité de l'alésage rectifié).

3.2 Outils abrasifs

À grains très fins. Ils sont des types super-durs ou durs.
Le diamant (synthétique), symbole D, possède une bonne action abrasive.
Le borazon, cristal cubique de nitrure de bore, symbole B, est de dureté immédiate après le diamant, avec la même caractéristique abrasive que le diamant.

Définition

Par leur lettre-symbole et un nombre indiquant la grosseur du grain qui correspond au diamètre moyen en µm. La norme DIN 848 indique : grains fins 7, 15, 30 ; gros grains 45, 50, 55, 70, 90, 100, 150, 180, 220 (fig. 13.13).

Grains fins. Utilisés en rodage de grande qualité.

Gros grains. Utilisés en rodage d'ébauche (plus grand débit).

Grosseur du grain. En particulier pour le diamant et le borazon, il n'a pratiquement pas d'influence sur l'état de surface à obtenir, jusqu'à 0,3 µm.

Les abrasifs sont agglomérés en pierres abrasives à monter sur support métallique (le porte-outil) qui s'adapte à la machine.
Ils sont en **poudre** pour rodage réciproque.

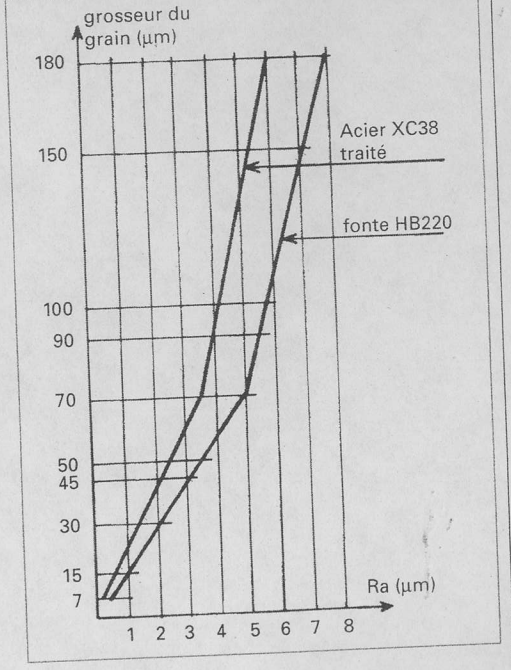
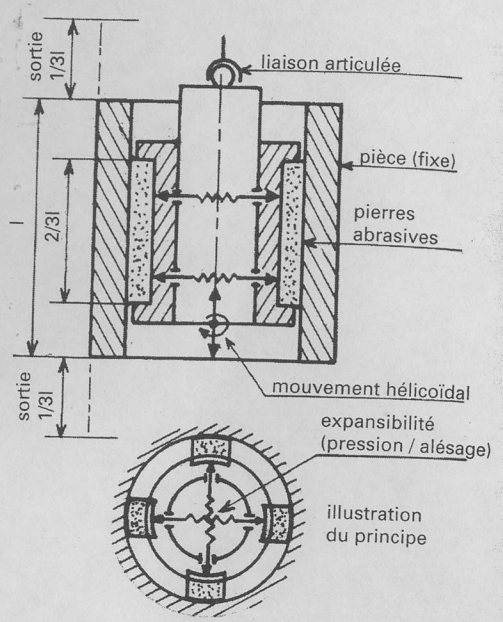


FIGURE 13.13
Exemple de rugosités obtenues avec des grosseurs de grain différentes.

Pierres abrasives

Pour assurer la cylindricité de l'alésage rodé : longueur des pierres = 2/3 longueur alésage ; en travail, sortie de chaque côté de l'alésage = 1/3 longueur des pierres (fig. 13.14).
Pression spécifique des pierres. De 20 à 60 bars, conditionnant la profondeur de passe, avec la grosseur du grain.
L'augmentation de pression accélère le rodage, en accroissant la profondeur de passe.

FIGURE 13.14
Schéma d'outil de rodage d'alésages.



Choix de l'outil

Abrasif. **Travaux de grande série : abrasifs super-durs, le diamant et le borazon qui ont une très** faible usure (assure le maintien géométrique des pierres).

Travaux autres qu'en grande série : carbure de silicium et corindon à grains fins (500 à 800).

Liant. Analogie avec rectification : grade tendre pour métaux durs et rodage d'extérieur (arbres, plans) ; grade durs pour métaux tendres.

Outil « ébauche » finition.

Technique du rodage plateau de PCI Meudon : assure une excellente finition (masse des pics réduite) avec maîtrise lubrification, asservissement mesure associée au battement en temps réel et aux expansions du couple de rodage (fig. 13.15).

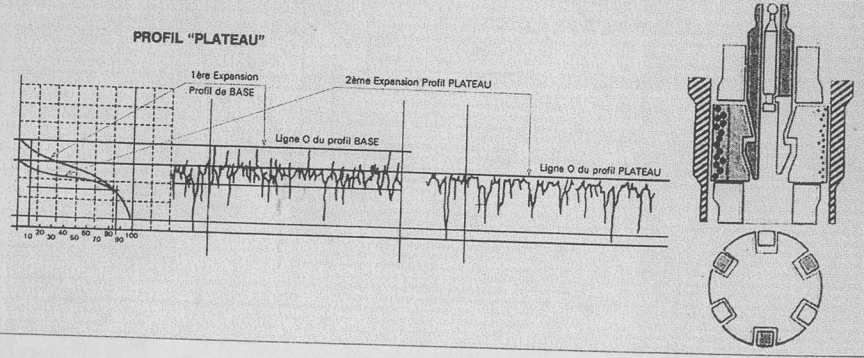


FIGURE 14.15 Schéma de rodoir « ébauche - finition » avec résultats d'un rodage.

Doc. PCI Meudon. (machine à CN)

3.3 Lubrification

Elle est forcée pour évacuer les micro-copeaux, les calories dues au frottement, les particules abrasives en suspension dans le liquide.

Lubrifier la zone de travail.

Le liquide a un pouvoir mouillant (pétrole à 30 % environ) et un pouvoir lubrifiant (huile).

Avant recyclage (automatique) il est filtré et éventuellement réfrigéré.

3.4 Surépaisseur de rodage

De 0,02 à 0,08 mm, selon les dimensions des pièces.

On considère : Formes cylindriques : [iT état de surface + iT géométrie] × 2

Formes planes : IT état de surface + IT géométrie.

L'auto-centrage du rodoir – monté flottant – permet de limiter la surépaisseur de rodage.

Profondeur de passe. Quelques dixièmes de µm. par passe, nécessaire pour roder une surface : enlèvement minimum de matière.

La prise de passe s'effectue automatiquement en continu, à chaque cycle.

3.5 Rodage d'intérieur (alésages)

Réalisé à l'aide de rodoirs cylindriques : support métallique des pierres à roder situées en périphérie et maintenues en pression contre la paroi de l'alésage (mécaniquement ou hydrauliquement).

Rodoir

Il est animé de deux mouvements simultanés : rotation continue et translation alternée (descendante et montante, suivant son axe) provoquant des trajectoires hélicoïdales (rodage à traits croisés) la pièce étant fixe (fig. 13.16).

Il reçoit une expansion par des cônes situés dans le porte-pièce, qui agissent sur les pierres. Il est monté flottant sur la broche de la machine : auto-centrage et auto-alignement rodoir/alésage.

Le système d'expansion est hydraulique (en enlèvement de matière au maximum) ou mécanique (en rattrapage des défauts de forme).

Les rodoirs à plusieurs pierres s'utilisent dans tous les cas, avec un nombre plus ou moins grand de pierres, selon les diamètres à roder et pour enlever le maximum de matière par passe.

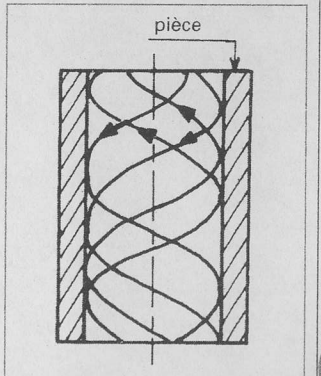


FIGURE 14.16 Trajectoires de rodage à « traits croisés ».

Vitesses de rodage

Le rapport entre les vitesses de rotation et de translation donne l'angle du trait croisé : tangente de l'angle/2 = vitesse de translation/vitesse de rotation.

À partir des vitesses conseillées, déterminer les deux vitesses pour obtenir des « traits croisés » entre 45° et 70° (production d'un enlèvement de matière maximum).

Vitesse de rotation du rodoir. 40 à 80 m/min pour le diamant, 35 à 60 m/min pour le borazon ; 10 à 20 m/min pour le corindon et le carbure de silicium.

Vitesse de translation du rodoir
Abrasifs diamant et borazon : 6 à 16 m/min dans l'acier ; 12 à 32 m/min dans la fonte.
Abrasifs corindon et carbure de silicium : 5 à 10 m/min.
Elle est maximale en ébauche et minimale en finition.

Rodage des alésages borgnes

Avec des pierres plus larges en bout : favorise le recoupement des hélices en fond d'alésage.

Rodage des alésages discontinus (avec cannelures)

Avec des pierres de largeur supérieure à celle des cannelures : ne détériore pas la cylindricité de l'alésage.

Rodage des alésages de petit diamètre

Rodoir à une pierre maintenue au contact de l'alésage par deux guides en carbure, en position triangulaire (fig. 13.17).
Rodoir monobloc à désaxage piloté par CN assurant la correction diamétrale en cours d'usinage.

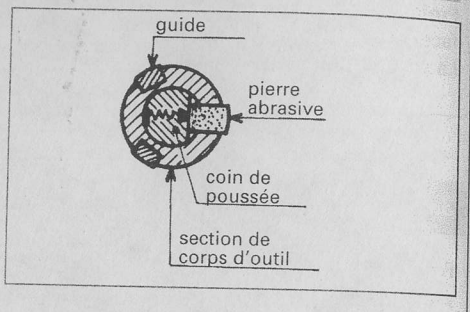


FIGURE 7.17
Section schématique de rodoir pour petits alésages.

Porte-pièces

Ils diffèrent selon les dimensions des pièces et les conditions géométriques à maintenir avec l'alésage à roder.
Pièces maintenues à l'unité sur la machine. Ne nécessite pas, en principe, une mise en position rigoureuse : outil flottant.
Pièces de faible épaisseur (généralement de petites dimensions). Peuvent être rodées simultanément avec le même rodoir.
Elles sont maintenues groupées en position fixe dans un support (fixe ou flottant).
Pièces avec condition géométrique rigoureuse. Perpendicularité alésage/face d'appui : rectifier ou roder cette face de référence avant rodage de l'alésage.
Les pièces sont groupées ou isolées dans des cages à empiler dans un porte-pièces (exemple de pignons avec condition rigoureuse de coaxialité profil extérieur/alésage).

Machines à roder

Généralement à broche verticale ; à broche horizontale pour les pièces très longues.
La capacité de rodage des alésages varie de 2 mm à 1 500 mm en diamètre et jusqu'à 8 mètres de longueur.
La qualité dimensionnelle peut être assurée à l'aide d'un système d'auto-calibrage qui maintient la cote automatiquement par jauge-tampon ou en boucle fermée (avec des abrasifs super-durs (machine à CN).

Rodeuses à table rotative

Optimisation du procédé de rodage de petits alésages en production de grande série : cycle rotatif de la table porte-pièces à n stations devant les broches porte-broches ; automatisation totale du processus ; intégration de la machine dans une ligne de production.

3.6 Rodage d'extérieur de pièces cylindriques

Il s'effectue avec une ou plusieurs pierres abrasives recevant un mouvement oscillatoire (30 à 40 périodes/seconde) de faible amplitude (1 à 5 mm) et sous une faible pression (≅ 4 bars) (fig. 13.18).
La pièce est animée en rotation à faible vitesse (4 à 10 m/min).
L'outil se translate à avance lente (0,1 à 0,5 mm/tr).
Opération peu employée : la rectification fine permettant d'obtenir la précision « superfinie ».

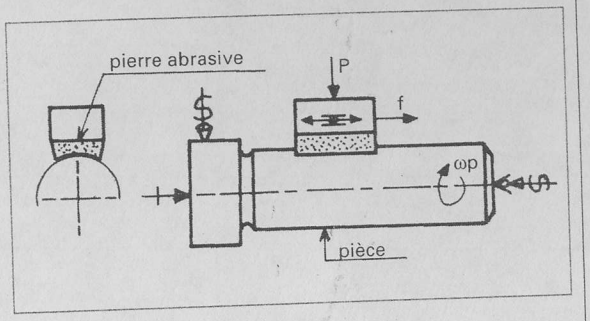


FIGURE 13.18
Schéma de principe du rodage cylindrique d'extérieur.

3.7 Rodage d'extérieur des pièces plates

Il s'effectue avec un rodoir cylindrique (travaillant de face).
Le rodoir est animé des mouvements de rotation (5 à 15 m/min) et de translation alternative (30 à 40 périodes/seconde) de faible amplitude (2 à 5 mm) (fig. 13.19).
La pièce est animée en rotation de 8 à 10 m/min sur machine à un rodoir, en rodage d'une face.
Le rodage simultané de deux faces parallèles s'effectue sur machine avec rodoirs opposés (fig. 13.20).
Plusieurs rodoirs agissant simultanément sur une même face (avec machine spécifique) ont des vitesses de travail supérieures au mono-rodoir, 15 à 20 m/min pour le rodoir, 30 à 40 m/min pour la pièce).

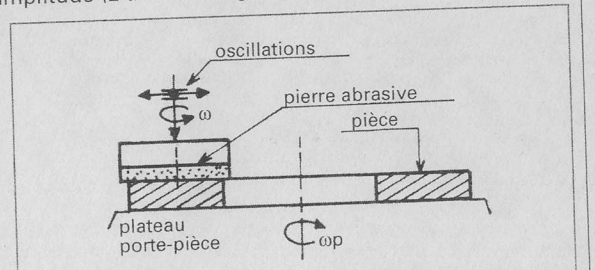


FIGURE 13.19 Schéma de principe du rodage plan.

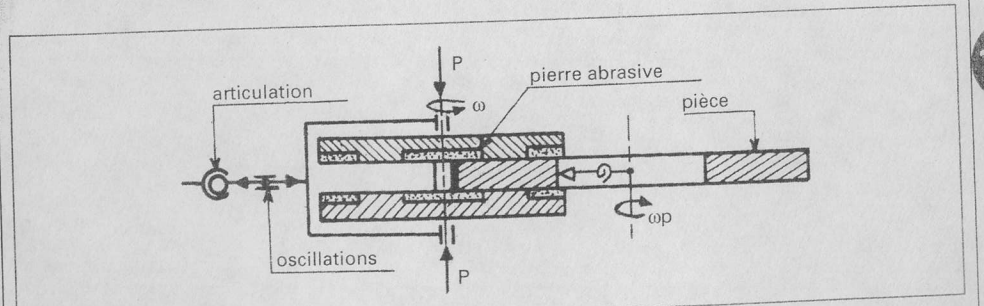


FIGURE 13.20 Schéma de principe du rodage de faces parallèles.

13

3.8 Rodage avec poudre abrasive

Il s'effectue en rodage réciproque, avec pâte abrasive interposée, de deux surfaces situées dans leur position fonctionnelle, provoquant le rodage mutuel des deux surfaces en contact.

La pression de contact ne doit pas être très forte (3 bars environ) pour ne pas chasser la pâte abrasive.

Une rotation alternée permet d'assurer le maximum d'efficacité.

On utilise ce procédé pour des pièces de type axile associées fonctionnellement avec un maximum d'étanchéité (clapets, soupapes...) (fig. 13.21).

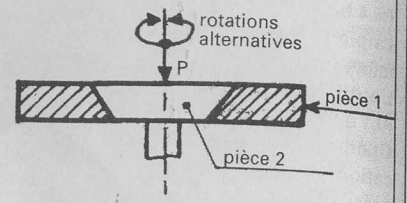


FIGURE 13.21 Rodage réciproque avec poudre abrasive.

4. Procédés de polissage

4.1 Généralités

Superfinition de surfaces planes par rodage à l'abrasif libre ou fixe par pression de la surface à roder sur un plateau de polissage animé en rotation.

Qualités obtenues

Rugosité très réduite, excellente planéité, fini spéculaire, surface portante élevée.

4.2 Outils abrasifs

Les abrasifs utilisés, en poudre (grains excessivement fins) sont super-durs ou durs : poudre de diamant, borazon, carbure de silicium, corindon (voir procédé de rodage).

Abrasif fixe

L'abrasif fixe est encollé sur un support (disque, papier ou latex imperméable).

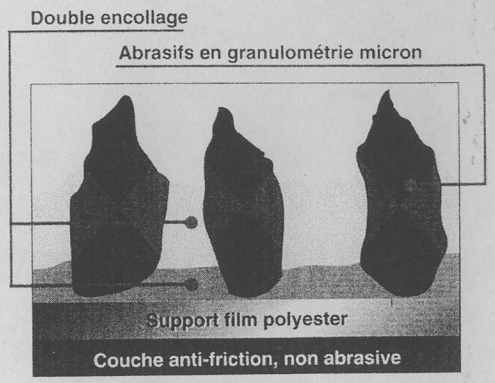
Utilisation généralement en prépolissage.

Support tendre : obtention d'un excellent fini spéculaire.

Support dur : obtention d'une excellente planéité.

Film de microfinition « Q 151 » de NORTON. Support polyester d'épaisseur précise (0,13 mm) avec abrasif en oxyde d'alumine à grains très fins (9 à 100 µm) (fig. 13.22). Possède un pouvoir anti-encrassant d'une résistance aux agents chimiques, produisant un fini excellent et régulier. Excellente durée de vie du film abrasif conçu en rouleaux et bandes.

FIGURE 13.22
Schéma du film « microfinition Q 151 » de polissage.
Doc. Norton



Utilisation. Sous huile entière ou émulsionnée, en polissage de pièces précises, type cylindrique pour grande série (automobile, hydraulique...).

Abrasif libre

Suspension abrasive pulvérisée sur le plateau porte-pièce où repose la surface à polir des pièces.

Utilisation en polissage et prépolissage, selon la finesse des grains.

Pièces à polir

De petites dimensions, elles sont usinées en nombre en les maintenant dans des platines placées en anneaux de maintien, le tout reposant sur le plateau de polissage.

4.3 Mouvements de génération

Une tête de polissage exerce la pression nécessaire sur les pièces. Elle reçoit un mouvement de rotation et un mouvement de balayage circulaire entraînant les pièces en rotation.

Le plateau de polissage tourne de 15 à 150 tr/min en variation continue, dans les deux sens.

Les différents mouvements (rotation du plateau, rotation et balayage de la tête de polissage), provoquant un mouvement louvoyant des pièces, produisent le polissage de leur face en appui sur le plateau, avec l'abrasif interposé.

Plateau de polissage. En fonte pour l'utilisation des abrasifs libres ; en aluminium pour l'utilisation des abrasifs fixes sur disque.

Tête de polissage. Elle exerce une force d'appui de 0 à 200 daN et balaie la table avec une amplitude variable de 0 au maximum de la surface de table.

4.4 Machines

Elles sont à plateau circulaire, réfrigéré (par air ou eau) en partie inférieure pour assurer la qualité de l'usinage.

Polissage en cycles automatiques, avec temps de polissage et degré de finition ; débit et fré-

quence de pulvérisation du liquide abrasif ; vitesse de balayage ; force d'appui ; temps de lavage (fig. 13.23).
Alimentation automatique des pièces.
Polissage entièrement automatisé pour la production de série.

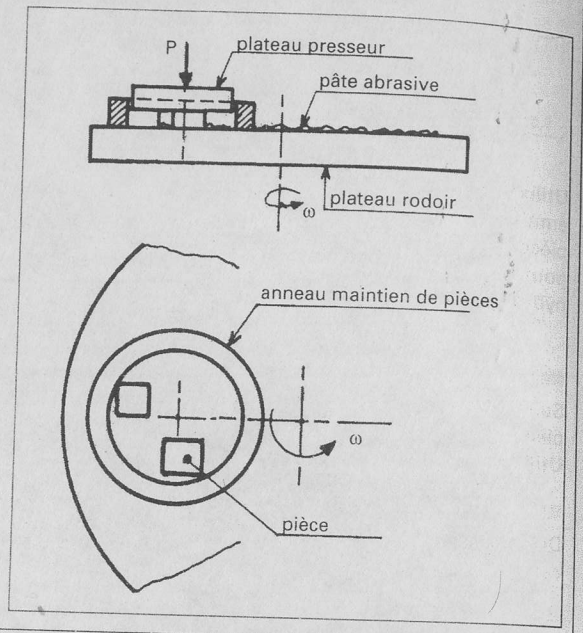


FIGURE 13.23
Schéma de principe du polissage à l'abrasif libre.

4.5 Utilisation

Production de petites pièces minces et fragiles en matériau dur, pour électronique, optique, informatique : obtention du fini spéculaire et d'une excellente planéité des surfaces fonctionnelles.
On utilise également ce procédé en métallographie pour l'examen microscopique d'échantillons de matériaux métalliques.
L'abrasif est le diamant sous forme de pâte ou de suspension abrasive.

14 PROCÉDÉS DE TAILLAGE, RECTIFICATION ET SUPERFINITION DES DENTURES

1. Généralités 439
2. Procédés de taillage de dentures par fraise-mère 440
   2.1 Généralités 440
   2.2 Mouvements générateurs 440
   2.3 Mouvement d'avance 441
   2.4 Précisions 442
   2.5 Conditions de coupe 442
   2.6 Outils fraises-mères (NF E 66-223) 443
   2.7 Appareillages 443
   2.8 Machines 443
   2.9 Utilisation 445
3. Procédé de taillage de dentures par outil-pignon 445
   3.1 Généralités 445
   3.2 Outil-pignon 446
   3.3 Mouvements générateurs 447
   3.4 Phase de taillage 447
   3.5 Taillage de dentures hélicoïdales 447
   3.6 Taillage de dentures d'intérieur 447
   3.7 Condition de coupe 448
   3.8 Machines à tailler 449
   3.9 Utilisation 449
4. Procédé de taillage de dentures par outil-crémaillère 450
   4.1 Généralités 450
   4.2 Outil-crémaillère 450
   4.3 Mouvements générateurs 451
   4.4 Phase de taillage 451
   4.5 Taillage de dentures hélicoïdales 451
   4.6 Utilisation et machines 452

5 Procédé de taillage de dentures par fraise de forme 452
5.1 Généralités 452
5.2 Utilisation 452
6. Procédés de taillage des dentures de roues coniques 452
6.1 Généralités 452
6.2 Taillage des dentures droites de roues coniques 453
6.3 Taillage des dentures courbes-spirales ou hypoïdes de roues coniques . 454
7. Procédé de formage des cannelures et des dentelures 456
7.1 Généralités 456
7.2 Formage longitudinal (cannelures, dentelures) 457
7.3 Matériaux 457
7.4 Précision 457
7.5 Utilisation 457
8. Procédé de rectification de dentures avec meule-mère 457
8.1 Généralités 457
8.2 Outil-meule 458
8.3 Mouvements générateurs 458
8.4 Roues à denture hélicoïdale, de petits modules 458
9. Procédé de rectification de dentures avec meule de forme 458
9.1 Généralités 458
9.2 Outils-meule 459
9.3 Utilisation 459
10. Procédé de rectification de dentures avec meules plates 460
10.1 Généralités 460
10.2 Machines " MAAG " à deux meules assiettes 460
10.3 Machines " NILES " à une meule biconique 461
11. Procédés d'ébavurage et de chanfreinage des entrées de dents 462
11.1 Ebavurage des entrées de dents 462
11.2 Chanfreinage des entrées de dents 462
12. Procédés de rectification des dentures de roues coniques 462
12.1 Généralités 462
12.2 Rectification des dentures droites 463
12.3 Rectification des dentures courbes (spirale ou hypoïde) 463
13. Procédé d'arasage - ou shaving - des dentures 464
13.1 Généralités 464
13.2 Outil d'arasage 464
13.3 Mouvements générateurs 464
13.4 Conditions d'utilisation 466
13.5 Utilisation 466
14. Procédé de rodage de dentures en développante 466
14.1 Généralités 466
14.2 Rodage avec roue-outil 467
14.3 Rodage réciproque 467

1. Généralités

Production et finition des dentures de pignons et roues cylindriques et coniques, des cannelures et dentelures, à l'aide de machines spécifiques.
Les traitements thermiques généralement effectués sur les dentures provoquent des déformations de profil, nécessitant une opération de rectification.

Procédés de taillage des dentures droites et hélicoïdales

- Taillage de dentures par fraise-mère, qui découle du principe d'engrènement d'une vis sans fin avec une roue, par fraisage.
- Taillage de dentures par outil-pignon, qui découle du principe d'engrènement de deux roues cylindriques, par mortaisage.
- Taillage de dentures par outil-crémaillère, qui découle du principe d'engrènement d'une roue avec une crémaillère, par mortaisage.
- Taillage de dentures par fraise de forme, réalisant la denture dent par dent, sans mouvement de génération, avec système de division par fraisage.

Procédés de taillage de roues coniques à denture droite, spirale et hypoïde

qui découlent du principe d'engrènement d'une roue conique avec une roue plate.
- Par mortaisage des dentures droites.
- Par fraisage des dentures spirale et hypoïde.
- Par brochage, sans mouvement de génération, de dentures droites.

Procédés de formage des cannelures et dentelures

Réalisation de profils par déformation de la matière entre deux molettes.

Procédés de rectification des dentelures

Obtention d'une excellente précision (profil, état de surface) et élimination des facettes sur flancs (superfinition).
Les différents procédés de rectification et de superfinition des dentures sont :
- Rectification par meule-mère, qui découle du même principe que le taillage par fraise-mère.
- Rectification par meule de forme, sans mouvement de génération avec système de division.
- Rectification par meules plates, qui découle du même principe que le taillage par outil-crémaillère.

Procédés d'ébavurage et chanfreinage des entrées de dents

Par rectification, pour ébavurage.
Par fraisage, pour chanfreinage.

Procédés de rectification des dentures de roues coniques, droites, spirales et hypoïdes

Découlent du même principe d'engrènement que les procédés de taillage de ces roues.

Procédés de superfinition des dentures

Découlent du principe d'engrènement de deux roues.
- Par rasage ou shaving.
- Par rodage.

2. Procédés de taillage de dentures par fraise-mère

2.1 Généralités

Le taillage s'effectue par génération du profil à obtenir, en fraisage de la denture, l'outil fraise-mère étant équivalent à la vis sans fin (fig. 14.1) : principe d'engrènement d'une vis sans fin avec une roue.

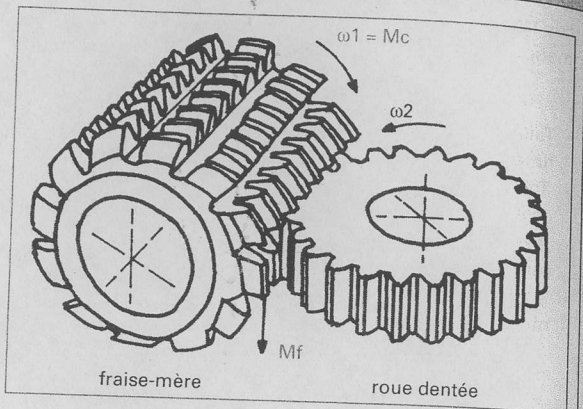


FIGURE 14.1
Schéma de principe d'engrènement roue et fraise-mère.

Des goujures longitudinales, perpendiculaires à l'hélice du filet, forment les faces de coupe, dont les arêtes de coupe des dents de la fraise-mère.

Les dents de l'outil, au profil de la denture à obtenir (dents d'engrenage, crabots...) sont détalonnées (fig. 14.2).

Une fraise-mère, d'un module (réel) donné, pourra tailler tous les diamètres de roues à denture droite ou hélicoïdale du même module, essentiellement en extérieur et dans les limites de capacités-machine.

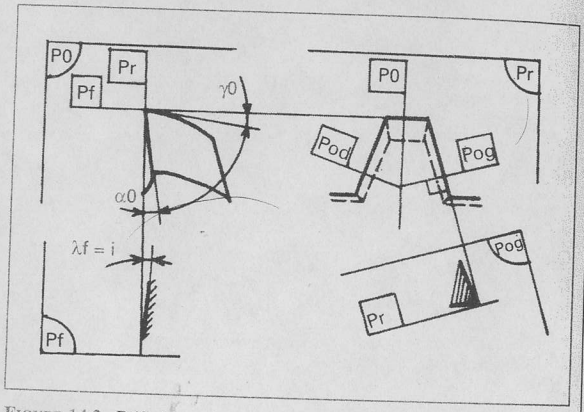


FIGURE 14.2 Définition géométrique d'une dent de fraise-mère.

2.2 Mouvements générateurs

La génération de dentures est obtenue par les mouvements conjugués des rotations de la roue à tailler et de la fraise-mère : rapport des vitesses angulaires
$\omega_0/\omega_1 = Z_1/Z_0$ (avec ω_0 = vitesse angulaire de la fraise ; ω_1 = vitesse angulaire de la roue à tailler ; Z_0 = nombre de filets de la fraise-mère ; Z_1 = nombre de dents de la roue à tailler.

Mouvement de coupe

Obtenu par la rotation de la fraise-mère.

2.3 Mouvement d'avance

Donné à l'outil.

Taillage denture droite

Mouvement parallèle à l'axe de la roue à tailler, la fraise-mère est inclinée de l'angle d'hélice primitive du filet par rapport à la denture (fig. 14.3).

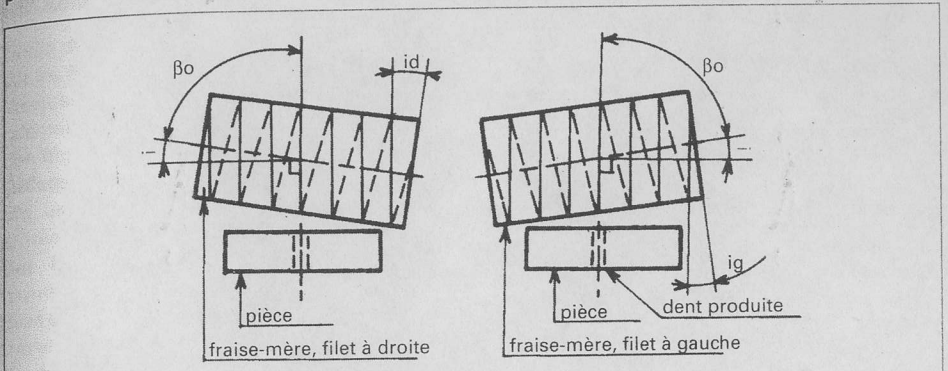


FIGURE 14.3 Position de la fraise-mère en taillage de dentures droites.

Taillage denture hélicoïdale

Mouvement donné suivant l'axe de la roue qui reçoit une rotation complémentaire ω_c mesurée au cylindre primitif (fig. 14.4).

La vitesse angulaire corrigée de la pièce sera

$$\omega' = \omega_1 + \omega_c$$

avec $\omega_c = f.\,\mathrm{tg}\,i\,/\,R$;
et f = avance/tour ;
R = rayon primitif de la pièce.

Inclinaison de la fraise-mère. Selon le sens des hélices primitives de la denture à tailler β et de la fraise-mère *i*, angle et sens d'inclinaison à donner à la fraise-mère varient, soit $\beta o = \beta \pm i$ (fig. 14.5).

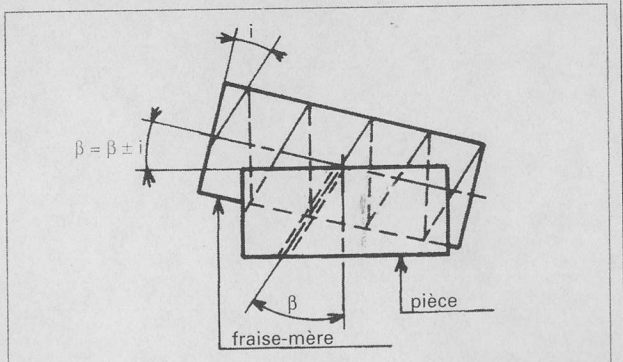
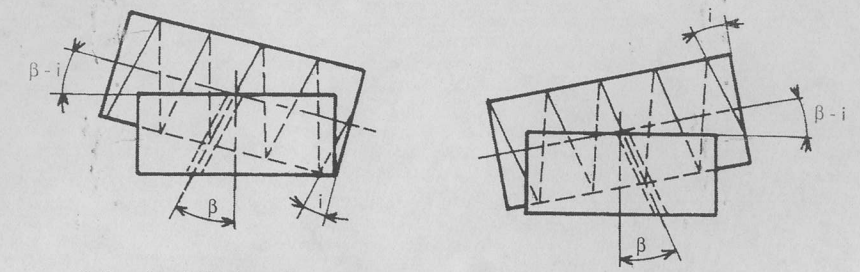


FIGURE 14.4 Position de la fraise-mère en taillage de dentures hélicoïdales.

Taillage en shifting

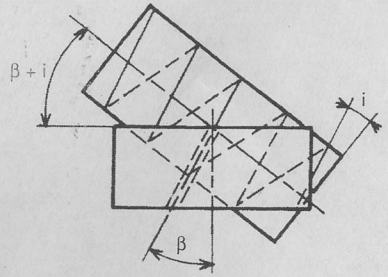
Déplacement complémentaire axial de la fraise-mère, l'outil travaille sur l'ensemble de sa denture, automatiquement, en continu ou périodiquement.

Le shifting en continu améliore l'état de surface des flancs de dentures.

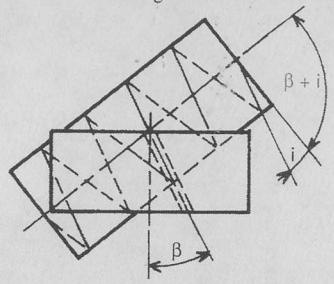


a - Fraise-mère : hélice à gauche
Pièce : hélice à gauche

c - Fraise-mère : hélice à droite
Pièce : hélice à gauche



b - Fraise-mère : hélice à droite
Pièce : hélice à gauche



d - Fraise-mère : hélice à gauche
Pièce : hélice à droite

FIGURE 14.5 Sens et angle d'inclinaison de fraise-mère en fonction de l'inclinaison des dentures à tailler.

2.4 Précisions

Erreur de division, 10 à 20 µm.

État de surface.

Le profil des dents présente des défauts de forme (suivant direction du mouvement d'avance, perpendiculaire au profil) : généralement, opération complémentaire de finition (rasage, rectification).

Shifting. État de surface, 3 à 4 µm sur flancs de denture.

Nota : Des facettes, plus ou moins importantes sur les flancs de dents, sont engendrées selon la vitesse d'avance et le nombre de dents des fraises-mères.

2.5 Conditions de coupe

Comparables à celles du fraisage.

Vitesses de coupe

Généralement, outils en ARS recouvert TIN : 100 m/min maxi.

Vitesses d'avance et vitesses de pénétration

Selon les machines et les conditions de travail : 0,05 à 6 mm/tour de roue à tailler.

2.6 Outils fraises-mères (NF E 66-223)

Outils de forme : affûtables essentiellement sur les faces de coupe.

Conçues pour tous modules et profils, généralement avec alésage de maintien en position (fig. 14.1).

Taillage des roues creuses. Les fraises-mères ont une entrée conique, et peuvent être arbrées (fig. 14.6).

Des lames rapportées, interchangeables, permettent d'éliminer les affûtages.

Elles sont en ARS et en carbure (productivité ; travail à sec).

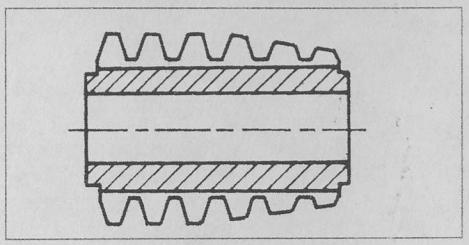


FIGURE 14.6 Fraise-mère pour taillage de roues creuses et dentures coniques.

Dentures cycloïdales et spéciales. Une fraise-mère est nécessaire pour chaque nombre de dents et chaque profil à obtenir.

Profils non réalisables par génération. En principe, obtention avec couteau-fraise.

2.7 Appareillages

Mise en position. Doit être précise avec un maintien efficace (importants efforts de coupe) : généralement assurée par mandrin à serrage automatique (hydraulique).

Pièces longues (pignons arbrés, arbres cannelés) : maintenues en montage mixte, avec centrage par pinces.

2.8 Machines

À broche porte-pièce(s) verticale ou horizontale.

Conçues pour la production unitaire à la grande série : entièrement automatisées et intégrables en cellule de production flexible (fig. 14.7).

Machines double-outil

Taillage simultané avec deux procédés différents : outil-fraise-mère pour dentures extérieures et outil-pignon pour dentures droites d'intérieur (ou d'extérieur : crabots...) (fig. 14.8).

Commandes numériques

Jusqu'à 8 axes automatisés, avec : commande de systèmes auxiliaires (chargement, palettisation...) ; programmes spécifiques.

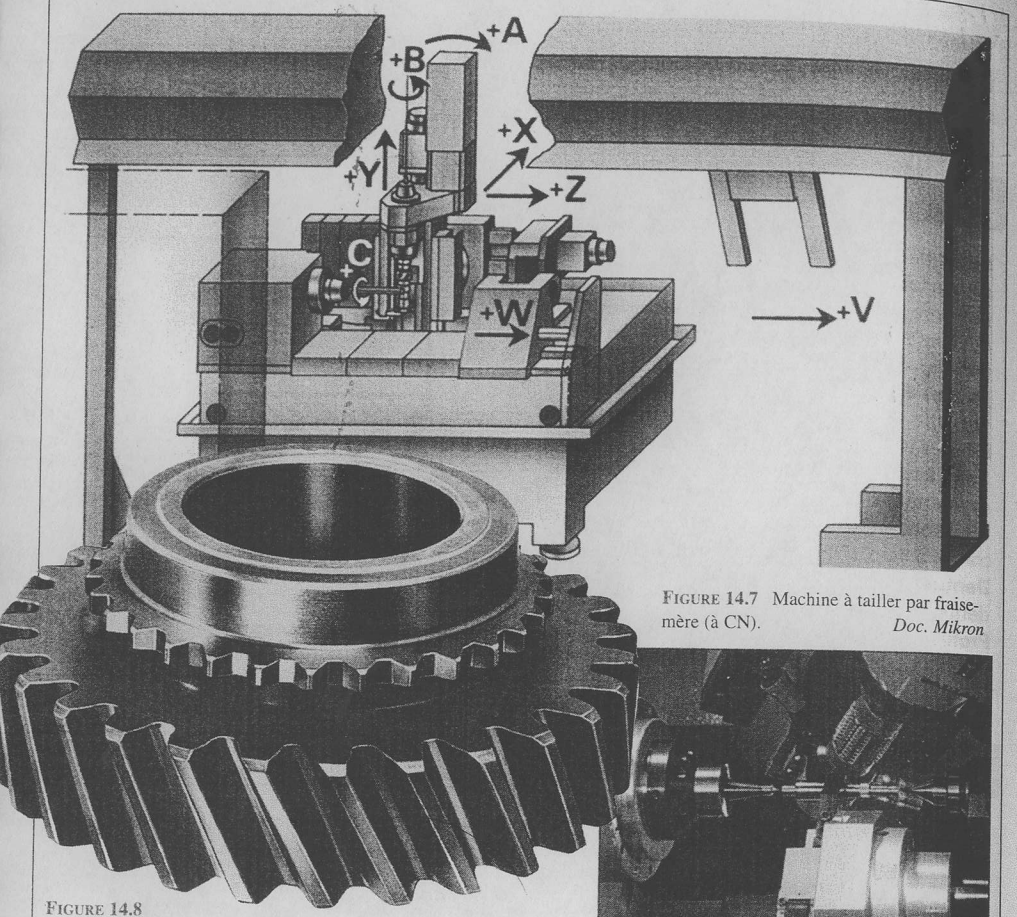


FIGURE 14.7 Machine à tailler par fraise-mère (à CN). *Doc. Mikron*

FIGURE 14.8
Exemple de pièce avec deux dentures obtenues simultanément sur machine à double outil (fraise-mère et outil-pignon).
Doc. Pfauter

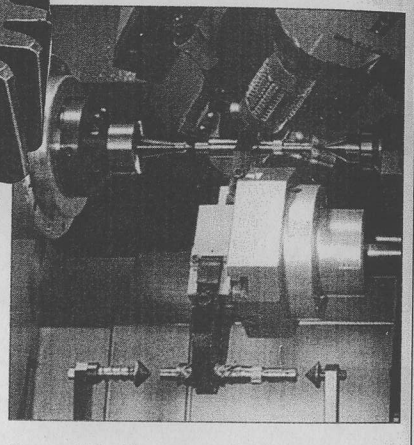


FIGURE 14.9 Chargeur rotatif de pièces à double pince sur machine à tailler par fraise-mère.
Doc. Mikron

Changement de pièces à double pince pour déchargement-chargement rapide (fig. 14.9).
Convoyeurs de pièces en diverses positions (couchées, sur support...) assurent la flexibilité.
Machines spéciales. Conçues pour la grande série : optimisation maxi de productivité et qualité (exemple : fraisage des entrées de denture et taillage à l'outil-pignon).

2.9 Utilisation

Procédé très productif (coupe continue). Production unitaire à la grande série, en taillage d'extérieur uniquement, pour tous types de dentures (fraises-mères au profil adapté à celui à obtenir).
Selon les machines (capacité et performances), taillage avant ou après traitement thermique de roues, pignons, vis, arbres.
Exemple machine Pfauter, taillage, avec appareillages spécifiques, de :
Roues à denture d'épaisseur décroissante sur la largeur des dents (fig. 14.10) et enveloppe extérieure cylindrique, avec un ou deux flancs pentés (pour utilisation en porte-à-faux, assurant le contact permanent, quelle que soit la charge) ; roues tangentes.
Roues à denture légèrement conique et bombée, à l'aide d'une fraise-mère cylindrique ou conique (fig. 14.11) selon les machines ; roues coniques, à denture droite ou hélicoïdale.
Vis sans fin à un ou plusieurs filets, vis à pas rapide.
Arbres cannelés à denture à flancs parallèles, enveloppe extérieure cylindrique et creux de dents coniques (pour assemblage sans jeu) ; rainures de clavetage.

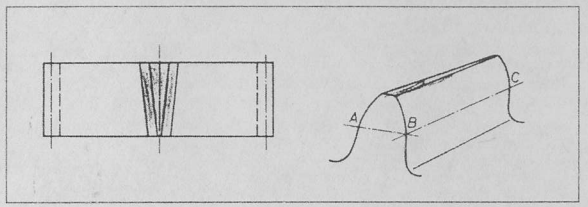


FIGURE 14.10 Schéma de roue à denture d'épaisseur décroissante réalisable sur machine à tailler Pfauter. *Doc. Pfauter*

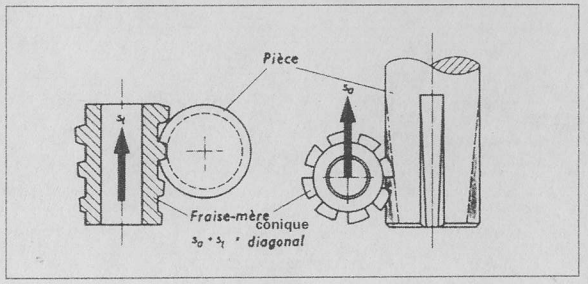


FIGURE 14.11 Schéma de taillage de dentures coniques. *Doc. Pfauter*

3. Procédé de taillage de dentures par outil-pignon

14

3.1 Généralités

Principe d'engrènement de deux roues cylindriques ayant même module (fig. 14.12).
Le taillage s'effectue par génération du profil à obtenir, en mortaisage de la denture, l'outil-pignon étant équivalent à une des deux roues d'engrènement dont les arêtes de coupe ont comme enveloppe la surface de denture d'une roue cylindrique « équivalente ».

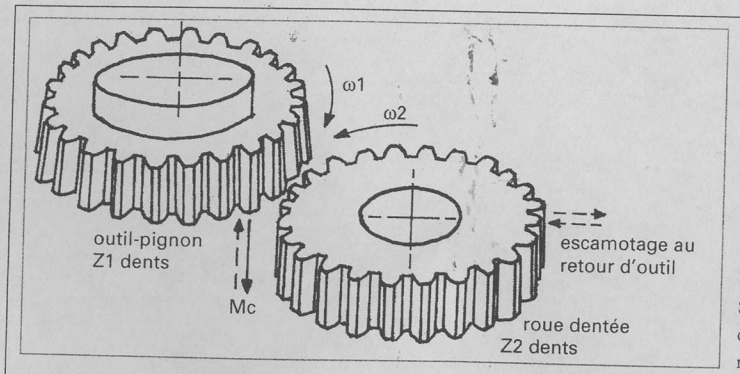


FIGURE 14.12
Schéma de principe d'engrènement roue et outil-pignon.

3.2 Outil-pignon

Outil de forme : affûtable essentiellement sur les faces de coupe.

Les dents de l'outil sont détalonnées : les faces de coupe sont situées sur un côté de l'outil-pignon (fig. 14.13).

Un outil-pignon, d'un module donné, pourra tailler tous les diamètres de roues à denture d'intérieur ou d'extérieur.

Wafer-Cutter. Lames coupantes interchangeables fixées sur un corps d'outil : suppression des affûtages (lames jetables) (fig. 14.14).

Matériau de coupe. ARS revêtu TIN, assurant une usure réduite.

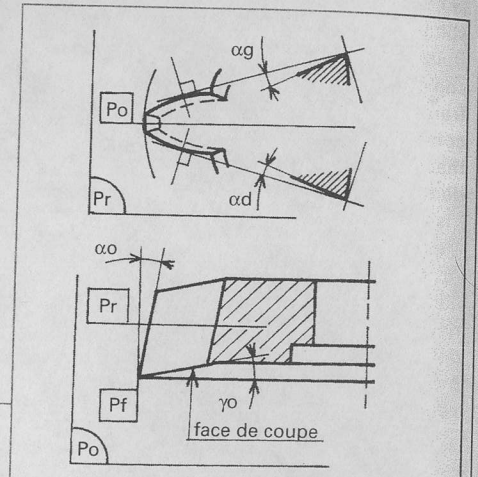
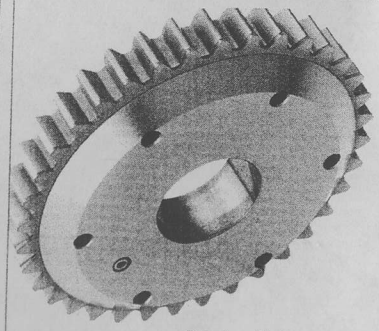
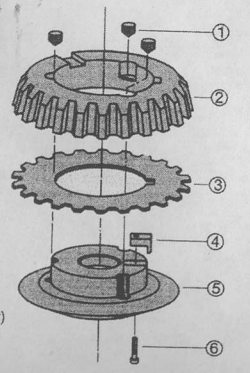


FIGURE 14.13
Définition géométrique d'une dent d'outil-pignon.





Principe d'éxécution d'un «Wafer-Cutter».

① Vis de fixation
② Corps de base
③ Lame coupante (Wafer)
④ Entraineur
⑤ Couvercle de pression
⑥ Vis d'entrainement

FIGURE 14.14 Outil-pignon à lame coupante amovible.
Doc. Pfauter

3.3 Mouvements générateurs

La génération de dentures est obtenue par les mouvements conjugués des rotations de la roue à tailler et de l'outil-pignon : rapport des vitesses angulaires $\omega_0/\omega_1 = Z_1/Z_2$ (fig. 14.12).

Mouvement de coupe

Rectiligne-alternatif où, durant sa course retour, l'outil est escamoté de la pièce, évitant la détérioration des arêtes de coupe.

Mouvement d'avance

Obtenu par les rotations conjuguées pièce-outil, après pénétration de l'outil à la profondeur désirée.

3.4 Phase de taillage

S'effectue en 1 ou 2 passes : Une passe avec outil-pignon finisseur, deux passes (ébauche et finition).

Taillage en deux passes

La première passe (ébauche) s'effectue à l'outil-pignon ébaucheur : laissant une surépaisseur de finition sur les flancs, le fond de denture est réalisé à la dimension finale.

Cycle d'ébauche. En 1 à n tours de pièce selon les modules, sous forte avance.

Cycle de finition. À avance réduite : génération du profil en développante avec état de surface désiré.

Surépaisseurs pour finition : 0,1 à 0,4 mm par flanc, selon les modules, soit : 0,1 mm pour $M \leqslant 1.50$; 0,2 pour M2 à 2.75 ; 0,25 mm pour M3 à 4 ; 0,3 mm pour M 4,25 à 5 ; 0,4 mm au-delà de M5.

Passe de finition

Avec subsistance d'une surépaisseur de rectification ou de superfinition à enlever après traitement thermique (de 0,05 à 0,15 mm, selon modules).

3.5 Taillage de dentures hélicoïdales

Le mouvement de coupe s'effectue suivant l'hélice primitive.

La denture de l'outil – de même angle d'hélice – est de sens opposé à la denture de la roue à tailler.

Nota : Le taillage à l'outil-pignon (dentures droites ou hélicoïdales) peut s'effectuer en tirant, à la remontée de l'outil (machines à broche verticale).

3.6 Taillage de dentures d'intérieur

Nécessite une gorge de dégagement d'outil dans les alésages borgnes de profondeur au moins égale à la hauteur des dents (fig. 14.15).

Les outils d'intérieur sont généralement à queue (petits diamètres) (fig. 14.16).

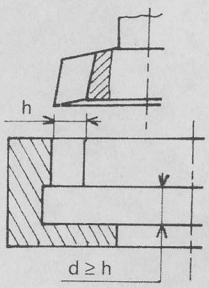


FIGURE 14.15 Schéma de taillage d'intérieur borgne.

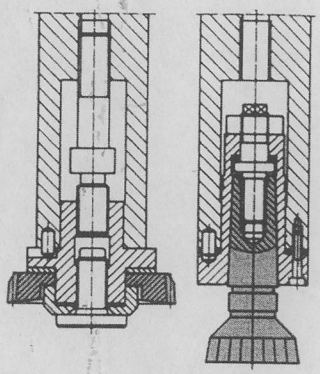


FIGURE 14.16 Montage d'outils-pignons, grand et petit diamètre. *Doc. Pfauter*

3.7 Condition de coupe

Avec machines à commande numérique, variables en continu.

Vitesse de coupe

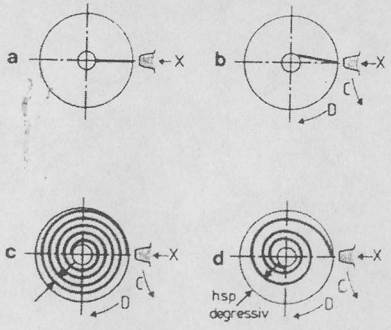
Donnée en nombre de coups/minute de l'outil : 250 à 2000 cp/min, variable en continu ou étagée selon les machines.

Vitesse d'avance

Correspond aux mouvements de rotation conjugués pièce-outil de 24 à 1000 mm/min.

Vitesse de pénétration

Donne la profondeur de passe.
De 1000 à 1800 mm/min, avec les possibilités : radiale avec ou sans développante ; spiralée radiale, constante ou dégressive (fig. 14.17).



a. avance radiale sans développante
b. avance radiale avec développante
c. pénétration en spirale avec avance radiale constante
d. pénétration en spirale avec avance radiale dégressive

FIGURE 14.17 Variantes de pénétration d'outil-pignon à la profondeur de denture en développante. *Doc. Lorentz*

3.8 Machines à tailler

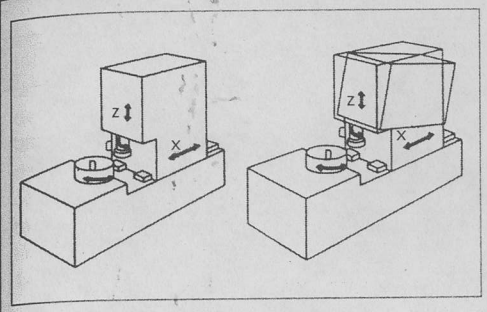
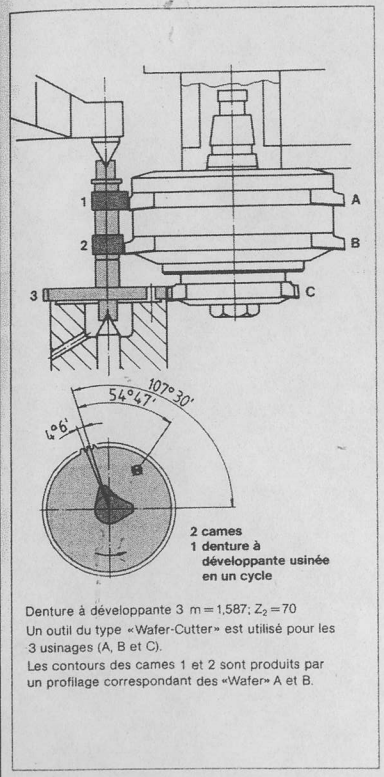


FIGURE 14.18 Schémas de machine à tailler par outil-pignon. *Doc. Lorentz*

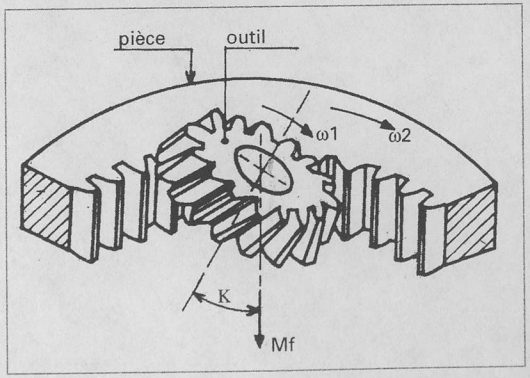


Denture à développante 3 m = 1,587; Z_2 = 70
Un outil du type «Wafer-Cutter» est utilisé pour les 3 usinages (A, B et C).
Les contours des cames 1 et 2 sont produits par un profilage correspondant des «Wafer» A et B.

FIGURE 14.19 Phase de taillage simultané (denture et cames) avec outils à lame amovible. *Doc. Pfauter*

À commande numérique 3 à 4 axes (XCD ; XCDZ) avec automatisation totale (intégration système de manutention) (fig. 14.18).
Sécurité. Aspiration des vapeurs d'huile (refroidie en continu).
Possibilités de taillage intégrées dans certaines machines : génération de dentures en avance spiralée et finition en développante ; taillage de dentures en positions relatives (secteurs, profils spéciaux) ; taillage simultané de plusieurs roues ou de roues avec des profils spéciaux (fig. 14.19) ; taillage conique, selon l'inclinaison possible du montant porte-outil.
Sur certaines machines. Taillage, avec les axes croisés de l'outil-pignon et de la roue à tailler, par outil pignon-fraise (fig. 14.20) : mouvement de coupe relatif réduisant les temps de coupe.
Machine de grande productivité : effectue des taillages simultanés d'intérieur à l'outil-pignon et d'extérieur à la fraise mère.

FIGURE 14.20 Schéma de taillage (d'intérieur) à outil-pignon avec axes croisés pièce et outil.



3.9 Utilisation

Taillage de dentures débouchantes ou contre épaulement, d'extérieur et d'intérieur en production unitaire à grande série.

4. Procédé de taillage de dentures par outil-crémaillère

4.1 Généralités

Principe d'engrènement d'une roue avec une crémaillère ayant même module (fig. 14.21).

Le taillage s'effectue par génération du profil à obtenir, en mortaisage de la denture, l'outil étant équivalent à une crémaillère dont les arêtes de coupe ont comme enveloppe la surface de denture.

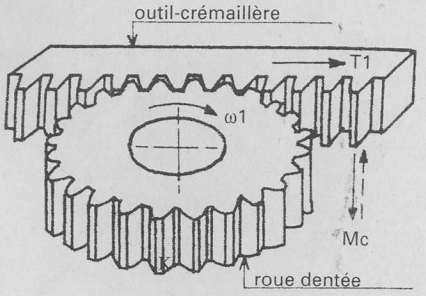


FIGURE 14.21
Schéma de principe d'engrènement roue et outil-crémaillère.

4.2 Outil-crémaillère

Outil de forme : affûtable essentiellement sur les faces de coupe.

Les dents de l'outil sont détalonnées : les faces de coupe sont situées sur un côté de l'outil-crémaillère (fig. 14.22).

Ils ont un profil correspondant à la crémaillère de référence, avec des variantes pour taillages : directement de finition, d'ébauche, avec surépaisseur de rectification sur flancs ou de rasage (avec chanfrein de tête).

Un outil-crémaillère, d'un module donné, pourra tailler tous les diamètres de roues à denture droite ou hélicoïdale, essentiellement d'extérieur.

Ils sont de relatif faible coût (quelques dents suffisent).

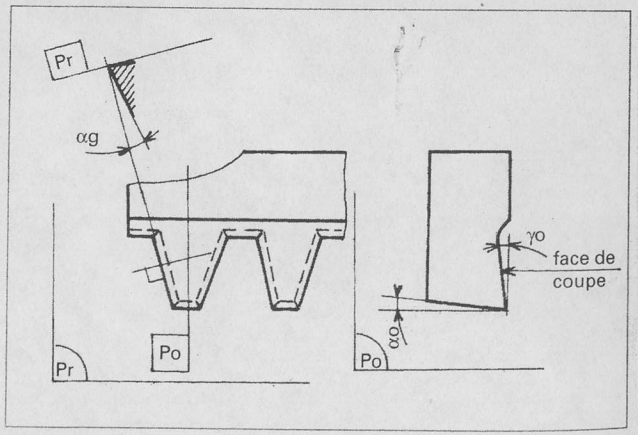


FIGURE 14.22
Définition géométrique d'une dent d'outil-crémaillère.

4.3 Mouvements générateurs

La génération de dentures est obtenue par des cycles carrés de la crémaillère dont le nombre de dents est limité (l'outil étant préalablement à la profondeur de dents), soit : les mouvements conjugués de rotation de la roue à tailler et de la translation alternative de l'outil-crémaillère (fig. 14.23).

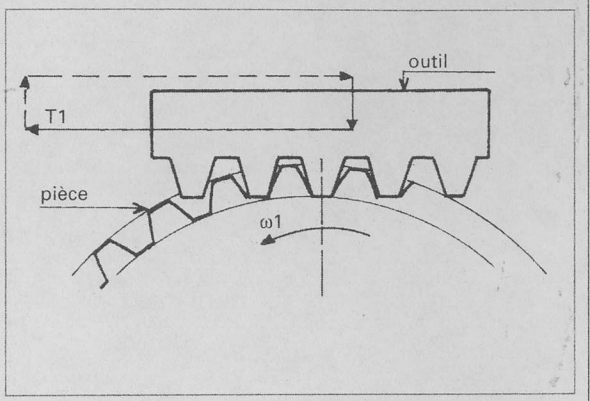


FIGURE 14.23
Cycle répétitif de l'outil-crémaillère.

Mouvement de coupe

Rectiligne-alternatif où, durant sa course retour, l'outil est escamoté de la pièce, évitant la détérioration des arêtes de coupe.

Mouvement d'avance

Obtenu par les mouvements conjugués rotation-pièce et translation-outil, après pénétration de l'outil à la profondeur désirée.

4.4 Phase de taillage

S'effectue en une ou deux passes (ébauche et finition avec le même outil) automatiquement.

4.5 Taillage de dentures hélicoïdales

Obtenu par inclinaison du porte-outil suivant l'angle d'hélice primitive.

Dentures hélicoïdales contre épaulement : avec un outil-crémaillère à denture inclinée de l'angle d'hélice à obtenir (fig. 14.24).

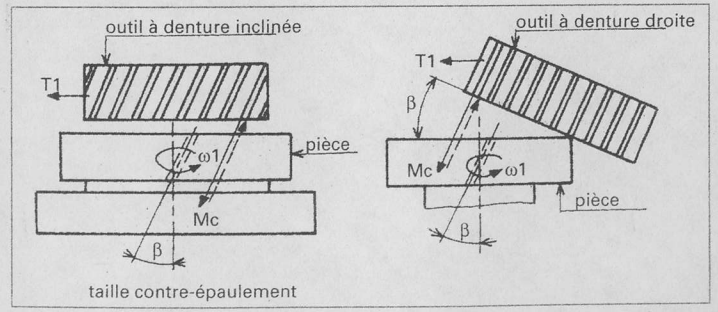


FIGURE 14.24 Schéma de taillage de dentures hélicoïdales.

4.6 Utilisation et machines

Procédé peu productif, pour taillage occasionnel d'extérieur de roues de grand diamètre, à dentures droites ou hélicoïdales (la pièce repose de son propre poids sur la table porte-pièce à axe vertical).
Les machines sont de type mortaiseuse, à coulisseau porte-outil vertical.

5. Procédé de taillage de dentures par fraise de forme

5.1 Généralités

Obtention de dentures dent par dent avec un outil-fraise ayant un profil identique à un inter-dent de la denture à effectuer (fig. 14.25).
Les fraises de forme utilisées sont du type fraise trois tailles.

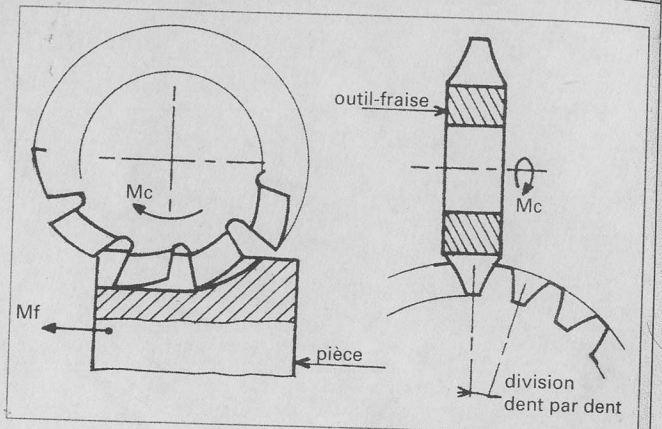


FIGURE 14.25
Schéma de taillage de dentures par fraise de forme.

5.2 Utilisation

Fraisage de cannelures à flancs parallèles et de dentelures, sur machine de fraisage (fraiseuses, centres d'usinage) à commande numérique.
Exceptionnellement, des dentures en développante, droites ou hélicoïdales, sont obtenues par ce procédé, avec outil-fraise au profil de l'inter-dent.

6. Procédés de taillage des dentures de roues coniques

6.1 Généralités

Les engrenages coniques ont des dentures pouvant être droites ou courbes (spiralées ou hypoïdes).

6.2 Taillage des dentures droites de roues coniques

Deux procédés sont utilisés : par génération et par outil de forme.

Taillage par génération

Mouvement de coupe rectiligne alternatif (mortaisage) : principe d'engrènement d'un pignon conique avec une roue plate (l'angle au sommet du cône primitif de la roue est de 180°) (fig. 14.26).
Le profil des dents du pignon étant en développante de cercle, le profil des dents de la roue plate est à flancs droits (crémaillère fictive conique).

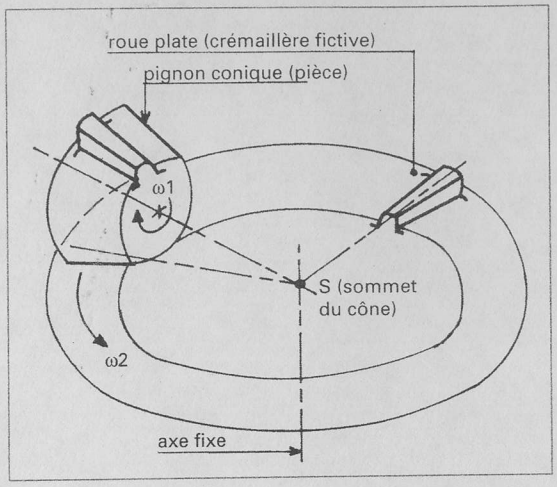


FIGURE 14.26
Schéma de principe d'engrènement pignon conique - roue plate (crémaillère conique).

Outil de taillage

Une dent de la crémaillère fictive est matérialisée par l'outil qui taille le pignon conique, en mortaisage dent par dent.
Un système de division permet le passage automatique de la dent taillée à la dent suivante.

Machines et mouvements de génération

Deux types de machines reposant sur le même principe, avec mouvement de génération différemment affecté, soit :
– **Rotation de la pièce et rotation de la crémaillère** fictive autour de leurs axes fixes respectifs (machine Gleason) (fig. 14.27).

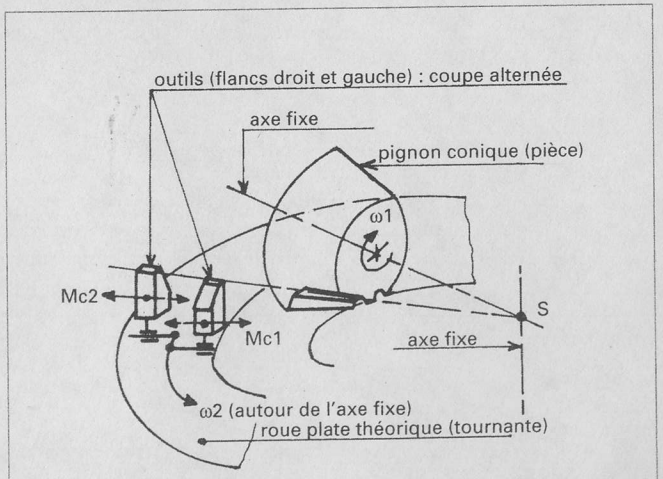


FIGURE 14.27
Schéma de principe du taillage conique avec machine Gleason.

– **Rotation de la pièce** autour de son axe et sur la crémaillère fictive (machine Reinecker) (fig. 14.28).
Mouvement de coupe donné à l'outil : rectiligne-alternatif.
Outil Gleason. Constitué de deux demi-dents complémentaires, en position décalée pour éviter leur rencontre vers le sommet du cône primitif.
Outil Reinecker. Équivalent à une dent de la roue plate.

Utilisation

De la production unitaire à la petite série.

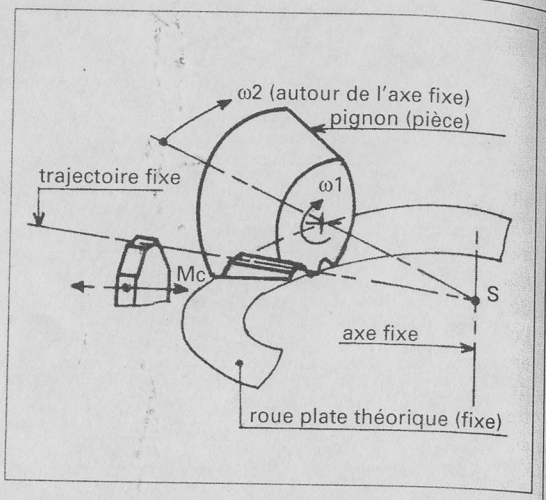


FIGURE 14.28 Schéma de principe du taillage conique avec machine Reinecker.

Taillage par outil de forme

Procédé de brochage des dentures droites sur cône, par outil rotatif à progression des dents de coupe (fig. 14.29).

Outil de taillage

Broche circulaire comprenant en périphérie : la progression des dents de coupe (voir chapitre « Procédés de brochage ») ; un secteur libre permettant la division (passage de la dent taillée à la suivante).
Le taillage s'effectue dent par dent (un tour de la broche produit une dent) en cycle automatique.

Utilisation

Procédé productif : pour travaux de grande série, une broche étant nécessaire pour chaque type de roues.

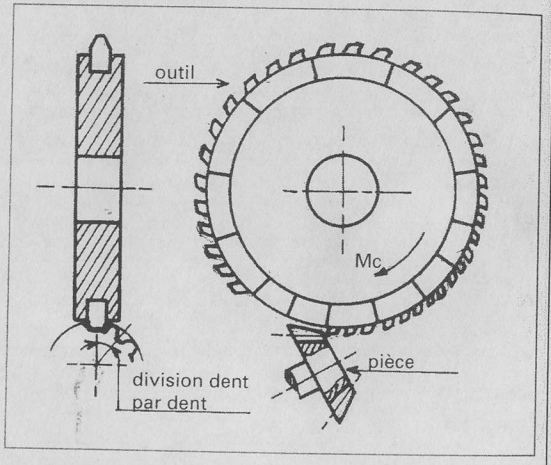


FIGURE 14.29 Schéma de principe du taillage conique par outil de forme (procédé Revacycle).

14.3 Taillage des dentures courbes (spirales ou hypoïdes) de roues coniques

Deux procédés de taillage par génération sont utilisés : par fraise frontale et par fraise-mère conique.

Ces deux procédés découlent du principe d'engrènement d'un pignon conique avec une roue plate (l'angle au sommet du cône primitif de la roue est de 180°).

Taillage par fraise frontale

L'outil est une fraise type tourteau dont l'ensemble des dents, à flancs droits, matérialise une dent de la roue fictive taillant un entre-dent du pignon à produire (fig. 14.30).

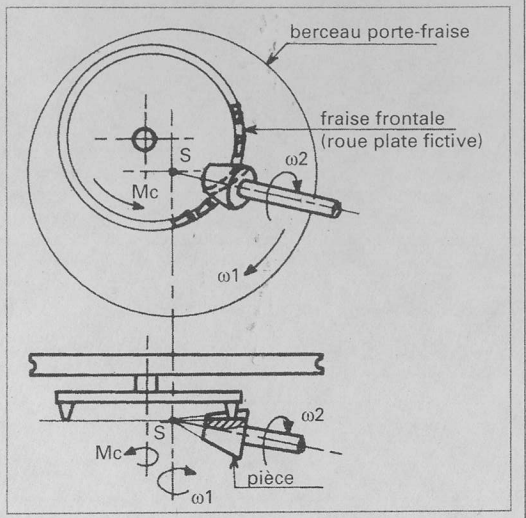


FIGURE 14.30 Schéma de principe du taillage de dentures courbes par fraise frontale (machine Gleason - spiral).

L'inclinaison des dents de la fraise diffère (machine Gleason hypoïd) d'un côté à l'autre, les rayons de courbure interne et externe des dents à tailler étant différents.
La coupe s'effectue en alternance (une dent, flanc droit ; la dent suivante, flanc gauche, etc.).
La hauteur des dents taillées est constante (hauteur de tête).
Après taillage d'une dent, la division est automatique pour le passage à la dent suivante.

Taillage de dentures hypoïdes

Il diffère du taillage à denture spirale par les positions relatives pignon à tailler et roue plate génératrice fictive, dont les axes ne sont pas concourants (fig. 14.31). Ce type de taillage s'effectue avec les mêmes machines que pour les dentures spirales.

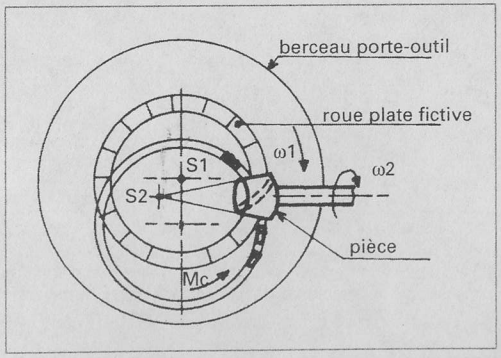


FIGURE 14.31 Schéma de principe du taillage de dentures hypoïdes (procédé Klingelberg).

Taillage par fraise-mère conique

L'outil est une fraise conique, type deux tailles à denture hélicoïdale et flancs droits, matérialisant la roue plate fictive sur laquelle roule la fraise en tournant autour du centre de cette roue plate fictive (fig. 14.32).
Les dents taillées ont même épaisseur sur toute leur longueur.

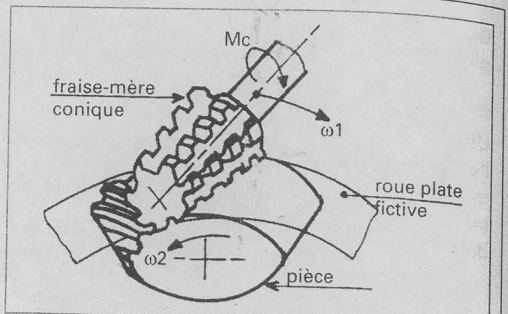


FIGURE 14.32
Schéma de taillage de dentures courbes par fraise-mère conique.

7. Procédé de formage des cannelures et des dentelures

7.1 Généralités

Procédé « incrémental » d'après le concepteur « Escofier » : Formage des dentures par la variation du profil évolutif de deux molettes à entraxe fixe (fig. 14.33).

La pénétration résulte de l'évolution du profil (progression incrémentale) de la partie active des outils-molettes entraînés positivement en rotation.

À chaque point du processus de pénétration relative, outil et pièce roulent sans glisser l'un sur l'autre.

Le sommet des profils obtenus n'est pas craté-risé : le fluage se produit de façon assez homogène dans une même direction (fig. 14.34).

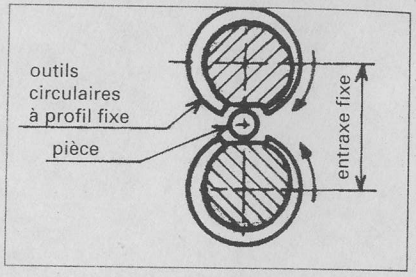


FIGURE 14.33 Schéma de formage entre molettes de cannelures et dentelures (d'après doc. Escoffier procédé « incrémental »).

Un point quelconque de la périphérie de la pièce se trouve en contact, de façon discontinue et répétitive, avec chacune des molettes (généralement 2, 3 ou 4 pour pièces creuses).

Pas de limitation d'angle d'hélice, ce qui permet l'obtention, avec précision, de dentures droites (fig. 14.35).

FIGURE 14.34 Fibrage de la matière par formage entre molettes. *Doc. Escoffier*

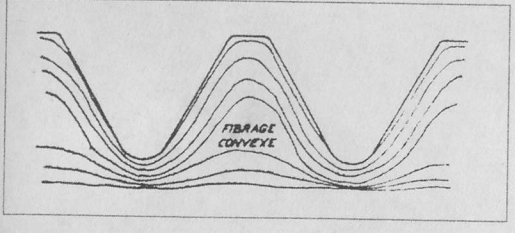
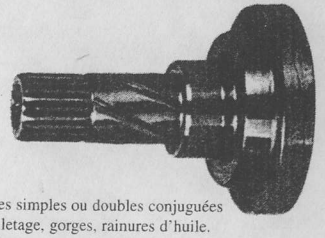


FIGURE 14.35
Dentures obtenues par formage
Doc. Escoffier



Dentures simples ou doubles conjuguées avec filetage, gorges, rainures d'huile.
Opération en une seule prise de pièce jusqu'à longueur 700 mm.
machine incrémental 300

7.2 Formage longitudinal (cannelures, dentelures)

Il y a distorsion entre la forme des molettes et celles à obtenir, nécessitant une correction d'outil pour les angles supérieurs à 45°.
Le profil des molettes est défini pour chaque angle d'hélice.

7.3 Matériaux

La plupart sont écrouissables suivant une loi linéaire de difficulté au fluage : chaque matériau présente une limite de résistance à la déformation qu'il faut dépasser pour provoquer le fluage.

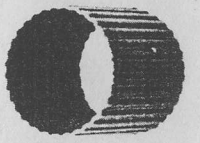
7.4 Précision

Les profils obtenus sont précis en forme et division, même avec un grand angle d'hélice et dentures droites (fig. 14.36).

Précision division. Relation outils/pièces constante durant le cycle.

Nota : Principe du formage à froid : voir chapitre « Procédés de filetage ».

FIGURE 14.36
Pièce obtenue par formage
Doc. Escoffier



Procédé Quatroll, pour bagues de roulement, calibrage intérieur de tubes, sertissage.
Diamètre de tube jusqu'à 70 mm, épaisseur de paroi jusqu'à 6 mm.
Machine H 18 SN à H 36 SN

7.5 Utilisation

Réalisation des cannelures, dentelures, dentures droites et hélicoïdales, en production de série (petite à très grande) dans des matériaux écrouissables (acier, inoxydable, titane...).
Temps de production. Rapide, quelques secondes à quelques minutes selon les pièces.
Avec alimentation automatique de la machine, la production est continue.

8. Procédé de rectification de dentures avec meule-mère

8.1 Généralités

La rectification découle du procédé de taillage par fraise-mère, soit engrènement d'une vis sans fin avec une roue de même module.

8.2 Outil-meule

Équivalent à une vis sans fin de grand diamètre et de faible épaisseur (procédé Reishauer) (fig. 14.37).

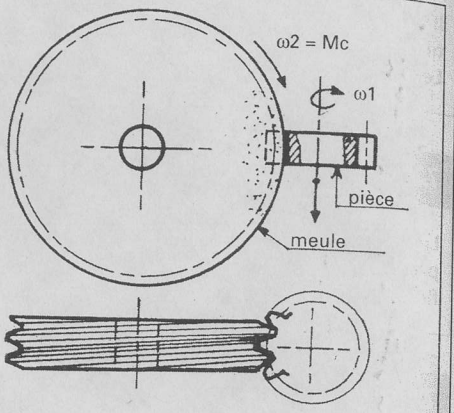


FIGURE 14.37
Schéma de principe de rectification de dentures avec meule-mère (procédé Reishauer).

8.3 Mouvements générateurs

La génération de dentures est obtenue par les mouvements conjugués de rotation de la roue à tailler et de la meule-mère (qui reçoit le mouvement de coupe).
Le mouvement d'avance est donné à la pièce, parallèlement à la denture qui est inclinée suivant l'hélice du filet de la meule.

8.4 Roues à denture hélicoïdale, de petits modules

Pour faciliter le retaillage, la meule peut être à section trapézoïdale, comme pour les dentures droites.
La meule étant d'un grand diamètre, l'approximation de la forme des dents peut être acceptable.

Procédé de rectification de dentures avec meule de forme

9.1 Généralités

La rectification s'effectue sans génération, à l'aide d'une meule au profil d'un inter-dent ou de deux meules (une pour chaque flanc et le fond de dent) (fig. 14.38).
Le mouvement d'avance s'effectue parallèlement à la denture (droite ou hélicoïdale).

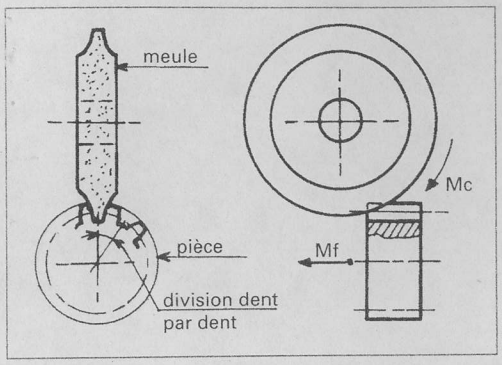


FIGURE 14.38
Schéma de principe de rectification de dentures avec meule de forme.

9.2 Outils-meule

Les meules sont en superabrasif pour éviter d'obtenir des défauts de profil des dents (fig. 14.39).
Le diamantage, avec le repositionnement des meules et la division (passage d'un interdent rectifié au suivant) sont automatiques.

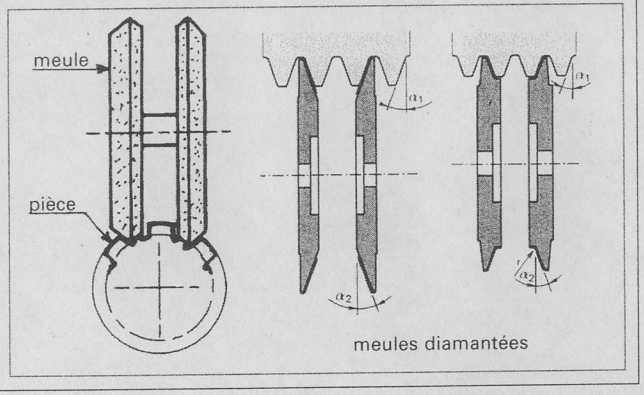


FIGURE 14.39
Meules de rectification de denture.
Doc. Fässler

9.3 Utilisation

Rectification des cannelures et des dentelures d'extérieur (arbres cylindriques) à flancs rectilignes ou en développante, avec deux meules, travaillant simultanément.
Taillage de dentures peu profondes dans des pièces en acier traité (lames circulaires...) (fig. 14.40).

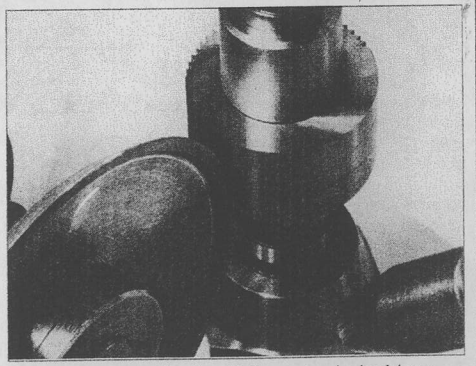


FIGURE 14.40
Exemple de taillage de dentures par rectification.
Doc. Mikron

Meulage d'un paquet d'environ 20 disques de scie circulaire en métal dur dans le plein avec meule diamantée.

10. Procédé de rectification de dentures avec meules plates

10.1 Généralités

La rectification découle du procédé de taillage par outil-crémaillère, soit l'engrènement d'une roue avec une crémaillère-génératrice de même module.
La crémaillère équivalente est définie par les plans de travail de deux meules assiettes ou d'une meule plate biconique.
La division est automatique : passage d'une dent rectifiée à la suivante.

10.2 Machines « MAAG » à deux meules assiettes

La génération de dentures est obtenue par les mouvements (rapides) conjugués de rotation et translation alternatives de la roue à rectifier (fig. 14.41).
Mouvements de coupe. Rotation des meules.
Mouvement d'avance. Translation lente des meules suivant la denture sur la largeur de roue à rectifier : balayage de tout le profil de dent.
Plusieurs cycles peuvent être nécessaires (ébauche, demi-finition, finition) avec compensation automatique de l'usure des meules (mesure, diamantage et repositionnement).

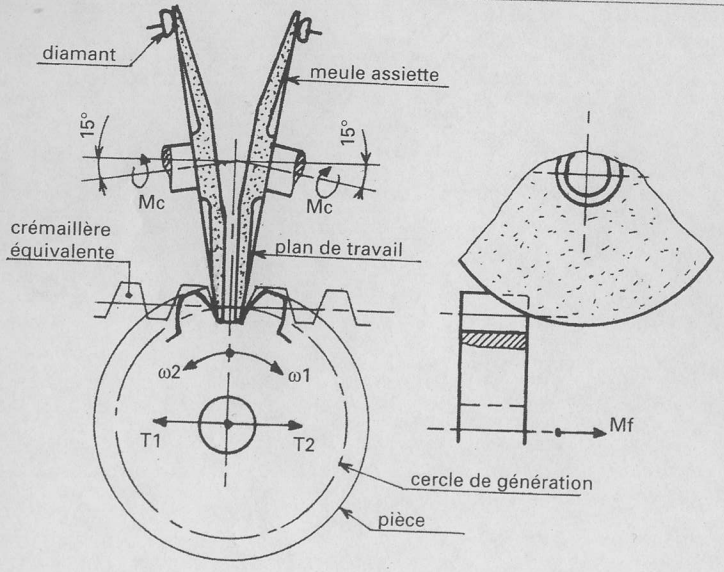


FIGURE 14.41 Schéma de principe de rectification de dentures avec meules assiettes (procédé MAAG).

Position des meules

– **Sans inclinaison** (0°). La plus courante (fig. 14.42).
– **Inclinées de 15°.** Le cercle de génération a pour rayon R = C/cos 15° = Rp. cos 20°/cos 15° ; (avec pour angle de pression normalisé, cercle de base C = rayon primitif Rp. cos. 20°).
Utilisation. Rectification de dentures en développante, d'extérieur droites et hélicoïdales (la meule est orientée de l'angle d'hélice primitive et la pièce reçoit un mouvement hélicoïdal).

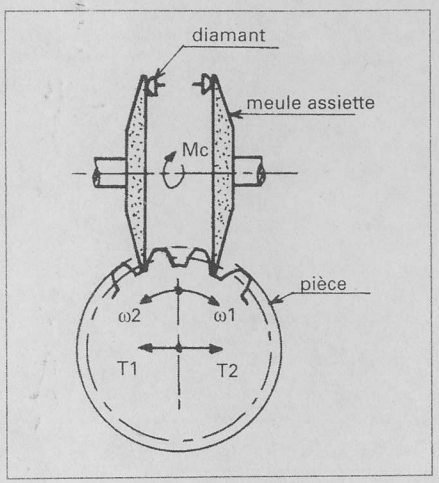


FIGURE 14.42
Schéma d'utilisation de meules sans inclinaison. (procédé MAAG).

10.3 Machines « NILES » à une meule biconique

La génération des dentures est obtenue par les mouvements conjugués, de rotation et de translation alternatives de la pièce, pour rectifier successivement chacun des deux flancs d'un entre-dent (fig. 14.43).
La meule, plate biconique, est au profil de la dent, mais d'épaisseur inférieure.
Mouvement de coupe. Rotation de la meule.
Mouvement d'avance. Translation lente de la meule suivant la denture sur la largeur de la roue à rectifier.

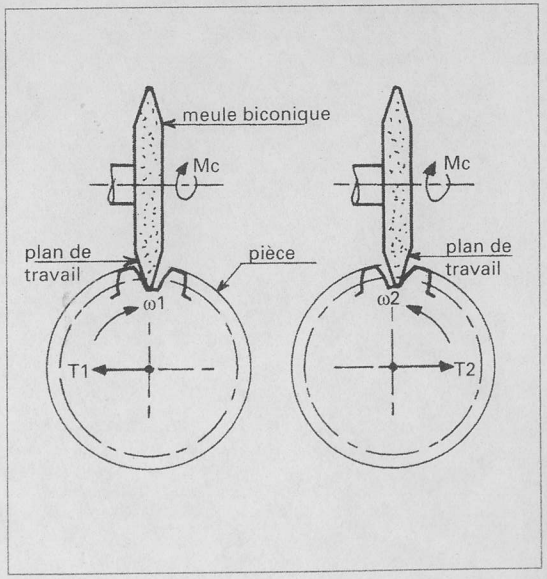


FIGURE 14.43
Schéma de principe de rectification de dentures avec meule biconique (procédé NILES).

11. Procédés d'ébavurage et de chanfreinage des entrées de dents

11.1 Ébavurage des entrées de dents

Il s'effectue par rectification à la meule de forme, sur les extrémités des flancs de denture droite ou sur l'extrémité des flancs situés du côté de l'angle aigu des dentures hélicoïdales (fig. 14.44).
On utilise une machine spécifique travaillant par division.

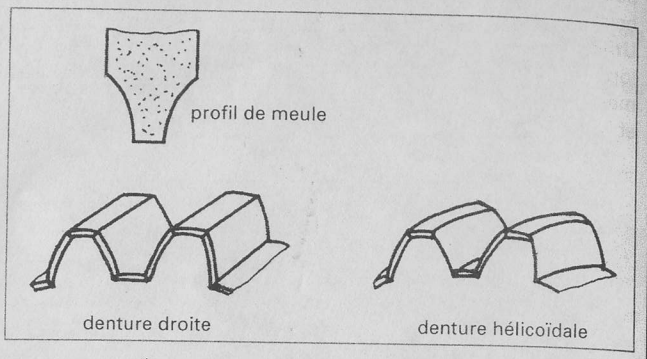


FIGURE 14.44 Ébavurage par rectification des entrées de dents.

11.2 Chanfreinage des entrées de dents

s'effectue par fraisage avec une raise cylindrique creuse (fig. 14.45).
On utilise une machine spécifique travaillant par division.

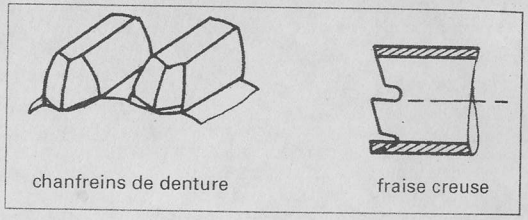


FIGURE 14.45 Chanfreinage par fraisage des entrées de dents.

12. Procédés de rectification des dentures de roues coniques

12.1 Généralités

sont comparables au procédé de taillage de ces dentures, soit le principe d'engrènement un pignon conique avec une roue plate.

12.2 Rectification des dentures droites

Mouvement de génération obtenu par les rotations de la pièce et de la crémaillère fictive (fig. 14.46).
Une dent de la crémaillère fictive est matérialisée par deux meules assiettes.
Mouvement de coupe (rotation) et **mouvement d'avance** (translation suivant la dent) sont donnés aux meules.

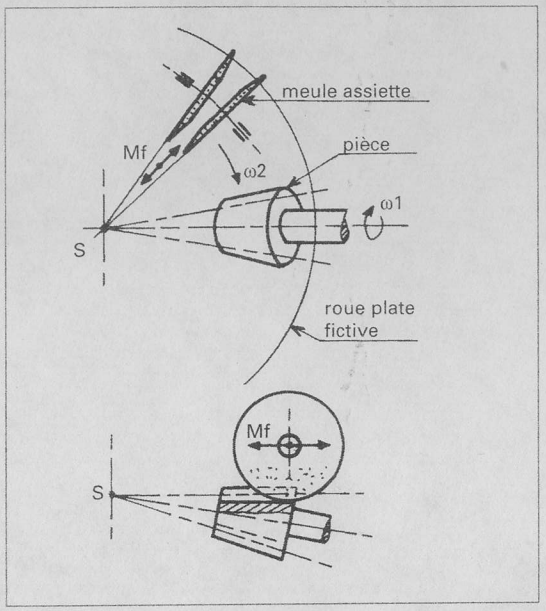


FIGURE 14.46
Schéma de principe de rectification de roues à denture droite (machine Gleason).

12.3 Rectification des dentures courbes (spirale ou hypoïde)

Mouvement de génération obtenu par les rotations de la roue à tailler et de la meule (route plate fictive) (fig. 14.47).
L'outil-meule est une meule boisseau de grand diamètre au profil rectiligne.
Machine. Celle utilisée pour la rectification et le taillage des dentures courbes (fig. 14.30).

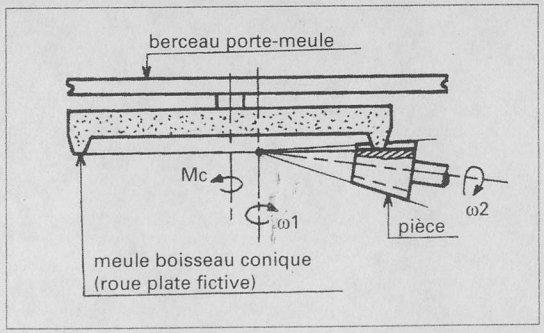


FIGURE 14.47 Schéma de principe de rectification de roues coniques à dentures courbes (machine Gleason hypoïd).

13. Procédé d'arasage – ou shaving – des dentures

13.1 Généralités

Superfinition des dentures découlant du principe d'engrènement de deux roues dentées de même module (une des 2 roues étant l'outil).

L'outil corrige les défauts de profil et d'état de surface sur les flancs de denture, par raclage d'une faible surépaisseur de matière.

Le raclage est obtenu par glissement relatif longitudinal des dentures, conjugué avec une pression de contact entre les deux roues (outil et pièce) qui constituent un engrenage gauche hélicoïdal (à axes croisés) (fig. 14.48).

Il peut s'effectuer : contre épaulement ; l'intérieur (l'angle de croisement est limité de 3° à 10°) ; avec bombement de dents (denture bateau) par basculement du porte-pièce.

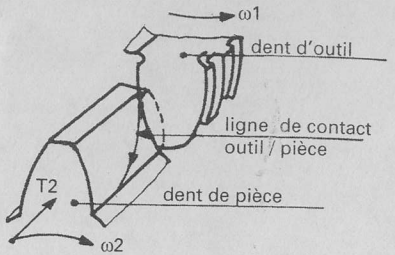


FIGURE 14.48 Schéma de principe de l'arasage.

13.2 Outil d'arasage

Roue cylindrique de grand diamètre (200 à 300 mm) à denture hélicoïdale.

Les flancs d'outil comportent des saignées rapprochées situées suivant la développante de cercle, dans le sens du profil, formant de nombreuses arêtes de coupe qui raclent les flancs (fig. 14.49).

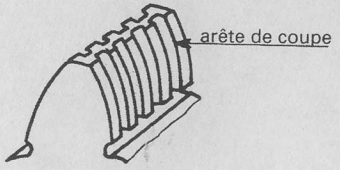


FIGURE 14.49
Schéma d'une dent d'outil d'arasage.

13.3 Mouvements générateurs

Les flancs d'outil glissent longitudinalement sur les flancs des dents à raser : la pièce – montée libre sur son support – est entraînée en rotation par l'outil-moteur qui se translate lentement.

Le glissement avec engrènement outil/pièce produit la coupe (de fins copeaux).

Les points de contact des flancs se situent sur une ligne inclinée par rapport à la denture (fig. 14.48) : la pression de contact provoque un écrasement d'une faible surface elliptique autour du point de contact théorique.

La translation est relativement lente pour raser toute la surface des dents.

Méthodes d'arasage

Plusieurs méthodes sont employées, selon le mouvement d'avance de l'outil : parallèle, diagonale, Underpass, plongée.

Arasage « parallèle »

Le mouvement d'avance est parallèle à l'axe de la pièce, la course de travail correspond à l'épaisseur de la roue à shaver (fig. 14.50).

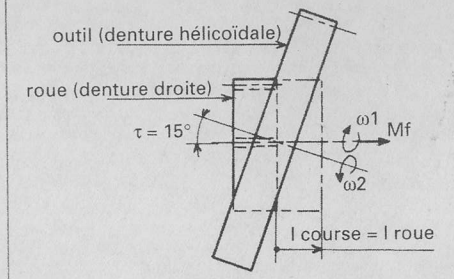


FIGURE 14.50
Schéma d'arasage « parallèle ».

Arasage « diagonale »

Le mouvement d'avance s'effectue suivant une direction oblique, ce qui diminue la course de travail (fig. 14.51).

Nota : Pour ces deux méthodes, l'outil est à dents rectilignes d'épaisseur constante.

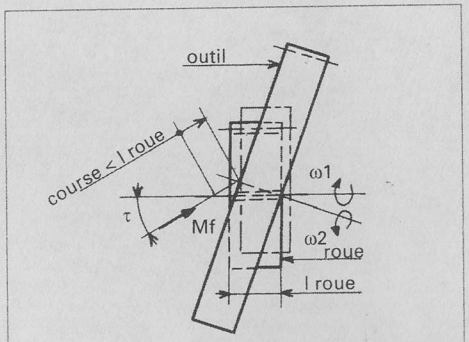


FIGURE 14.51
Schéma d'arasage « diagonale ».

Arasage « Underpass »

Le mouvement d'avance s'effectue perpendiculairement à l'axe de la pièce, diminuant encore la course de travail (fig. 14.52).

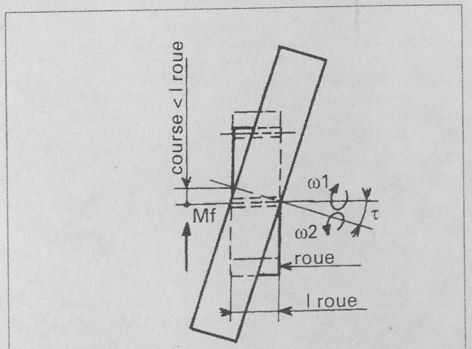


FIGURE 14.52
Schéma d'arasage « Underpass ».

Arasage en plongée

Le mouvement d'avance s'effectue en plongée dans la pièce, la course de travail correspondant à la hauteur des dents.

Nota : Pour ces deux méthodes, l'outil est à dents incurvées.
L'angle de croisement t des axes pièce et outil varie de 5 à 45°, selon les matériaux (pour matériau tendre, angle maximum, et inversement).
La surface d'écrasement augmente avec la diminution de l'angle de croisement.

13.4 Conditions d'utilisation

Obtention en quelques passes, avec excellent état de surface, des flancs de denture.
Surépaisseurs d'usinage. De quelques centièmes (0,02 à 0,05 mm selon les modules).
Profondeur de passe. 0,5 µm à 50 µm, selon la dureté des matériaux.
Pression de contact. 20 à 300 hbars.
Durée de vie d'outil ≅ 10 000 roues entre deux affûtages ; ≅ 20 affûtages maxi.
Vitesses d'engrènement : 60 à 120 m/min ; elle varie avec la dureté du matériau et l'état de surface.
Vitesses de translation. 0,10 à 1,5 mm/tour de pièce.

13.5 Utilisation

Superfinition automatique et rapide de roues en : acier (au carbone, nickel, chrome..., avant traitement thermique), fonte, alliages d'aluminium, matières plastiques.

14. Procédé de rodage de dentures en développante

14.1 Généralités

Découle du principe d'engrènement de deux roues dentées de même module.
Le rodage s'effectue en réciproque ou avec une roue-outil, à l'aide d'un liquide abrasif qui érode la denture.

14.2 Rodage avec roue-outil

Obtenu par la rotation conjuguée des deux roues (outil et pièce) avec glissement des dents d'outil, parallèlement aux dents de la pièce qui produisent, avec le liquide abrasif, le rodage des flancs.
Procédé analogue au procédé d'arasage (fig. 14.48).
La roue-outil, en fonte spéciale, rode ≅ 1 000 pièces mini sans usure significative.

14.3 Rodage réciproque

Obtenu avec les deux roues d'un engrenage, mis en rotation dans leur position fonctionnelle, qui se rodent mutuellement avec l'arrosage abrasif.
Le rodage s'effectuera seulement par frottement ; il n'y a pas glissement des dents en contact : rodage médiocre, donc à pratiquer exceptionnellement.

15 PROCÉDÉS DE TOURNAGE

1. Généralités 471
   1.1 Pièces produites 471
   1.2 Machines utilisées 472
   1.3 Mouvements générateurs 472
2. Outils de tournage 473
   2.1 Définition géométrique 474
   2.2 Outils d'extérieur 475
   2.3 Outils d'intérieur 476
   2.4 Matériaux outils 477
3. Vitesse d'avance 479
   3.1 Grandes avances 479
   3.2 Avances de finition 479
   3.3 Rayon de bec 479
4. Section de copeau 480
5. Vitesses de coupe 481
   5.1 Différents procédés de filetage 481
   5.2 Choix des vitesses de coupe et d'avance 481
   5.3 Plaquettes revêtues en multicouches 483
   5.4 Vitesses de coupe réduites 483
6. Puissance nécessaire à la coupe PW 484

7. Mise en œuvre 484
7.1 Pièces cylindriques courtes et plates 484
7.2 Pièces cylindriques longues 487
7.3 Opérations de fonçage de formes courtes 489
7.4 Opérations de filetage 489
7.5 Opérations de perçage et fraisage 489
7.6 Opérations de suivi de profil 490
7.7 Formes intérieures 490
7.8 Pièces brutes de forgeage et moulage 491
7.9 Pièces cylindriques multiformes 491
7.10 Pièces cylindriques volumineuses 491
7.11 Pièces usinées en décolletage 491
7.12 Opérations de moletage 491
7.13 Opérations de centrage – dressage 492
8. Appareillages support-pièce 493
8.1 Tournage en l'air 493
8.2 Tournage en mixte 495
9. Machines 497
9.1 Tours à CN 497
9.2 Centres de tournage 497
9.3 Tours frontaux 498
9.4 Tours à décolleter 499
9.5 Tours verticaux 499
9.6 Tours séquentiels 500

1. Généralités

Obtention de pièces cylindriques courtes et longues à partir de bruts coulés, forgés, dans la barre.

1.1 Pièces produites

Elles peuvent être de dimensions : très petites (∅ = 1 mm, longueur quelques mm) ; très grandes (plusieurs mètres de diamètre ou de longueur) (fig. 15.1).

Précisions obtenues

Dimensionnelle. Qualité 7 ; 6 avec machines très précises.

Obtention dans l'ensemble des matériaux métalliques et non métalliques (plastiques, bois...) avec des outils spécifiques aux formes à obtenir.

État de surface : 1,6 à 0,4 Ra, avec rayon $r\varepsilon$ ou plat $b\varepsilon$ de bec (fig. 15.2).

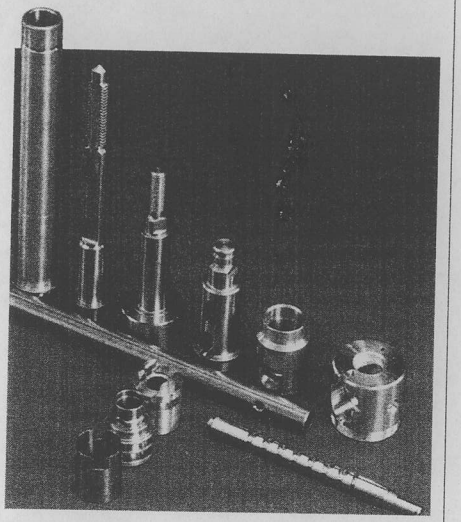


FIGURE 15.1
Pièces type cylindrique produites en une phase sur tour automatique « cicom M16/M20 ».
Doc. Citizen

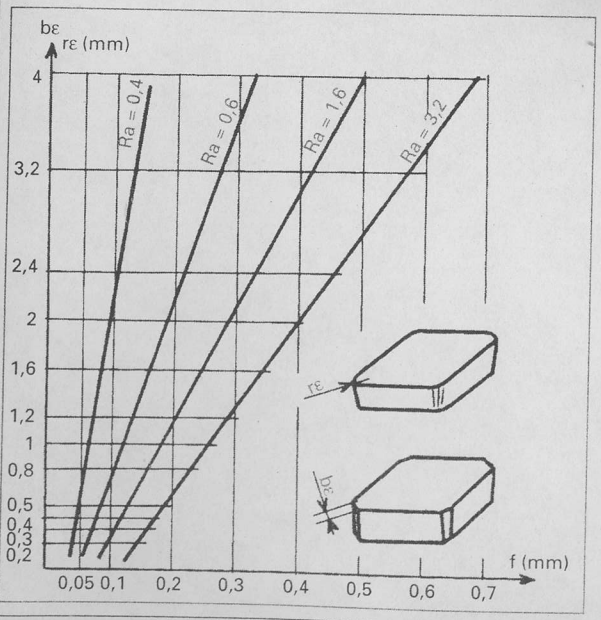


FIGURE 15.2
Ordre de grandeur d'états de surface obtenus en fonction de l'avance et du bec d'outil en tournage finition.

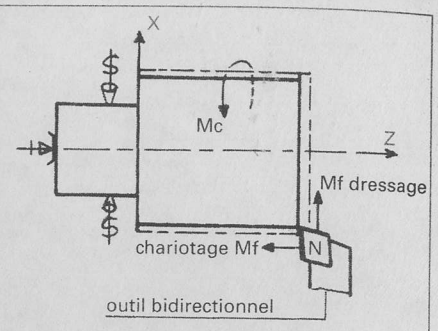
1.2 Machines utilisées

En fonction particulièrement des dimensions et des types de pièces (avec tours à commande numérique mono ou bibroche, centres de tournage, tours à décolleter, tours frontaux, tours verticaux, tours séquentiels).

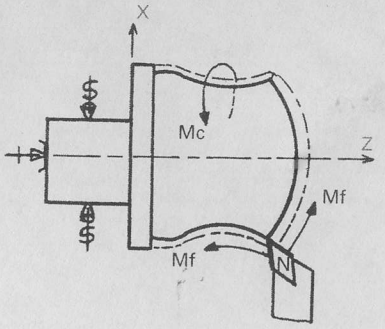
1.3 Mouvements générateurs

Mouvement de coupe, circulaire, donné à la pièce ; mouvement d'avance, translation donnée à l'outil (fig. 15.3).

Mode d'action avec une seule arête de coupe.



a. Mouvements paraxiaux (X ou Z)



b. Mouvements de contournage (X et Z) (suivi de profil ; copiage).

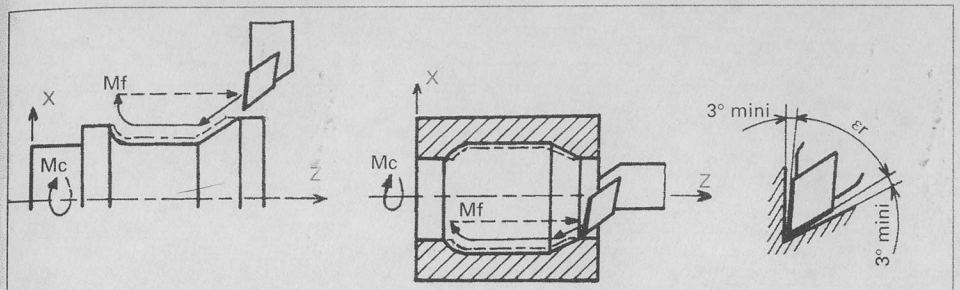
FIGURE 15.3 Mouvements générateurs en tournage (formes d'extérieur).

2. Outils de tournage

Outils d'enveloppe et de forme

Outils d'enveloppe. Obtention de formes axiles réglées (cylindre, cône, plan... par translation de l'outil à une arête de coupe (d'angle de direction adapté à l'opération).

De forme profilée quelconque par combinaison translation-plongée avec outil losangé (suivi de profil limité par l'angle de pointe ϵ_r) à 2 arêtes de coupe (outil bidirectionnel) (fig. 15.4).



a. outil d'extérieur

b. outil d'intérieur

c. angle limite d'outil d'enveloppe

FIGURE 15.4 Trajectoires d'outils d'enveloppe et angle de pointe limite.

Outils de forme. Obtention de formes cylindriques de profil quelconque court (chanfrein, gorge, rayon...) par plongée d'outil à une arête de coupe (fig. 15.5).

Les différents types d'outils et leur géométrie sont normalisés (NF E 66.331...).

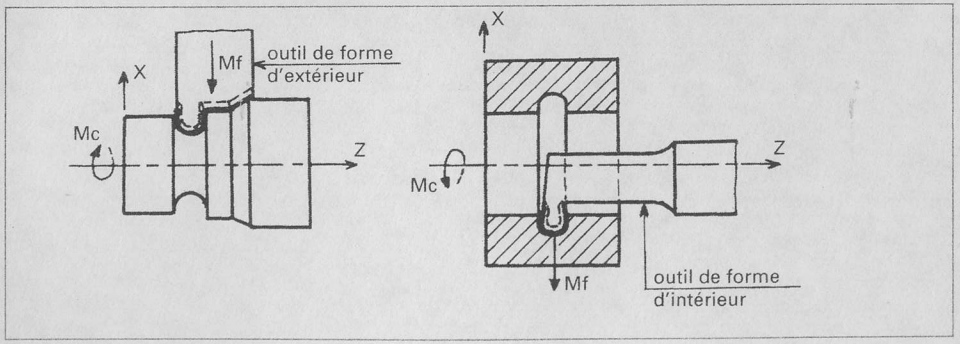


FIGURE 15.5 Schémas d'outils de forme.

2.1 Définition géométrique

Angles caractéristiques de la partie active contenus dans les plans de référence.

Angles de l'utilisateur

Outil en main, avec directions de coupe et d'avance supposées orthogonales.
On considère, pour les outils d'extérieur et d'intérieur (fig. 15.6) :

- la face de coupe sur laquelle se déroule le copeau ;
- la face de dépouille au regard de la surface travaillée ;
- l'arête de coupe principale, intersection des faces de coupe et de dépouille ;
- l'arête de coupe secondaire, dont l'intersection avec l'arête de coupe principale forme le bec ou pointe d'outil ;
- le plan de référence P_r qui est parallèle à l'axe du corps d'outil ou passe par l'axe ;
- l'angle de direction d'arête κ_r (kappa r) formé par le plan d'arête P_s et le plan de travail P_f, dans le plan de référence P_r ;
- l'angle de pointe ϵ_r (epsilon r) formé par le pan d'arête P_s et le plan d'arête secondaire, dans le plan de référence P_r ;
- l'angle de coupe orthogonal γ_0 (gamma 0) formé par la face de coupe et le plan de référence P_r, dans le plan orthogonal P_0 ;
- l'angle de dépouille orthogonale α_0 (alpha 0) formé par la face de dépouille et le plan d'arête P_s, dans le plan orthogonal P_0 ;
- l'angle de taillant orthogonal β_0 (bêta 0) dont sa valeur est $90° - (\gamma_0 + \alpha_0)$;
- l'angle d'inclinaison d'arête λ_s (lambda *s*) formé par l'arête de coupe principale et le plan de référence P_r, dans le plan d'arête P_s ;
- le rayon de bec ou de pointe r_ϵ (*r* epsilon), intersection des arêtes de coupe principale et secondaire, dans le plan de référence P_r.

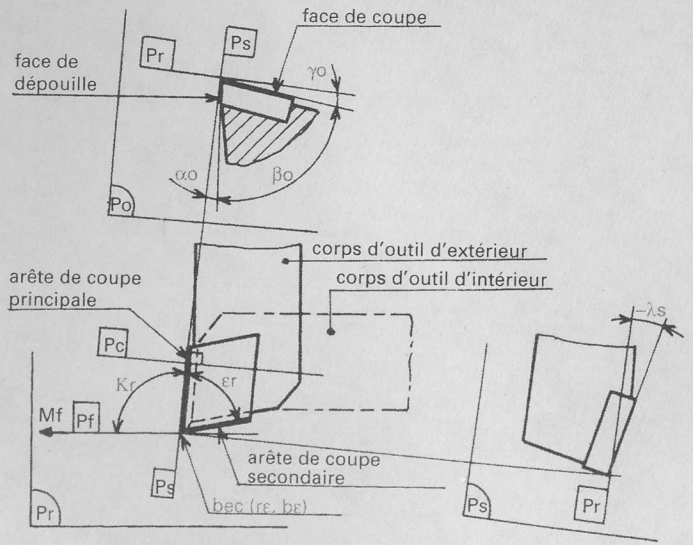


FIGURE 15.6 Définition géométrique des outils de tournage.

Sens de coupe

Avec une arête de coupe : **à droite**, symbole R (right) ; à gauche, symbole L (left).
Avec 2 arêtes de coupe ; **dans les 2 sens**, symbole N (neutral) (fig. 15.7).

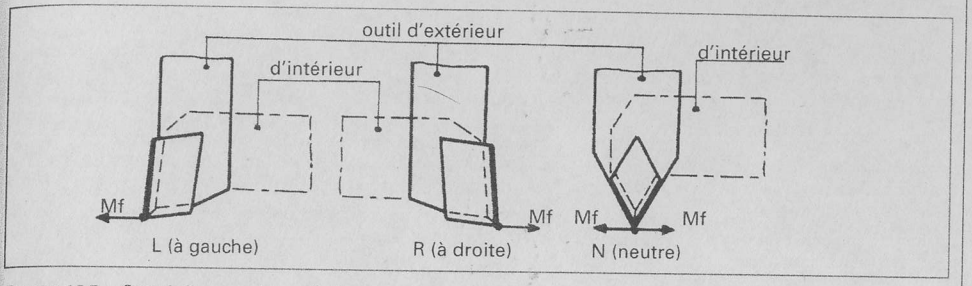


FIGURE 15.7 Sens de la coupe des outils de tournage.

2.2 Outils d'extérieur

Principaux outils (fig. 15.8) :

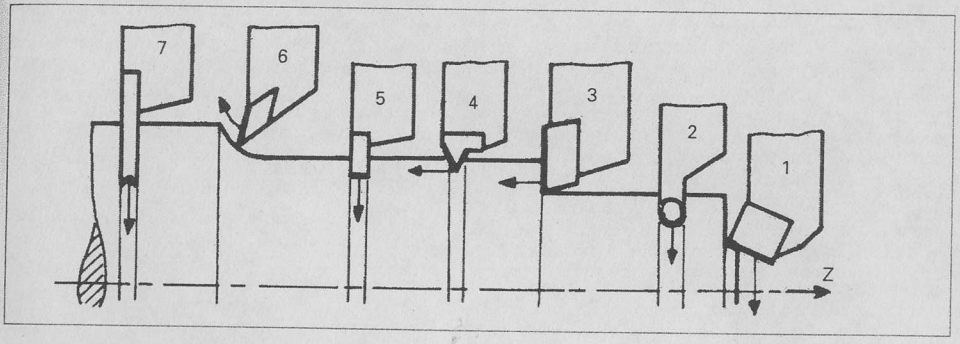


FIGURE 15.8 Schémas des principaux outils de tournage d'extérieur.

1. **Outil à dresser** : surfaçage de faces : usinage de grandes surfaces, en fortes passes.
2. **Outil à profiler** : surfaçage de profil avec rayons d'intersection, principalement de formes en creux : usinage de larges gorges.
3. **Outil couteau** : chariotage des cylindres et cônes : usinage d'ébauche en fortes passes.
4. **Outil à fileter** : obtention de filets au profil de l'outil : usinage en cycle de passes.
5. **Outil à gorge** : outil de forme de largeur et de profil correspondants à la gorge à obtenir : usinage en plongée.
6. **Outil à copier** : suivi de profils quelconques, dans les limites permises par l'angle de pointe : usinage bidirectionnel, idéal pour tous profils à obtenir (fig. 15.9).
   Angles de bec ϵ_r standards : 80°, 60°, 50°, 40°.
7. **Outil à tronçonner** : débit de pièces usinées dans la barre : usinage en plongée.

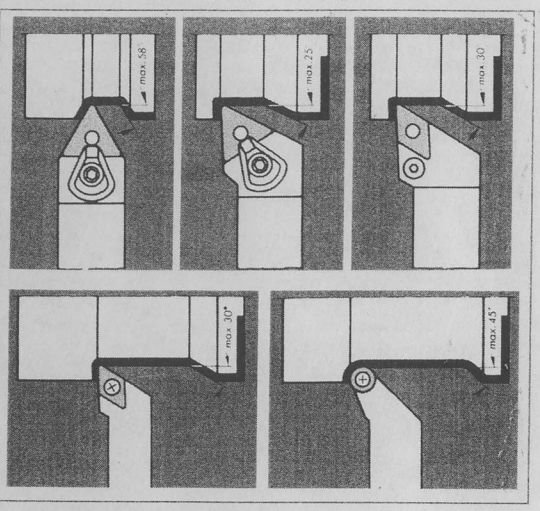


FIGURE 15.9
Outils à copier d'extérieur.
Doc. Widia

2.3 Outils d'intérieur

Principaux outils (fig. 15.10) :

8. **Outil à aléser.** Alésage de cylindres et cônes : usinage d'ébauche et de finition.
9. **Outil à fileter d'intérieur.** Obtention de filets au profil de l'outil : usinage en cycle de passes.
10. **Outil à gorge d'intérieur.** Outil de forme de largeur et de profil correspondants à la gorge à obtenir : usinage en plongée.
11. **Outil à copier d'intérieur.** Suivi de profils quelconques dans les limites permises par l'angle de pointe et l'accès de l'outil : usinage bidirectionnel, pour tous profils (fig. 15.11).

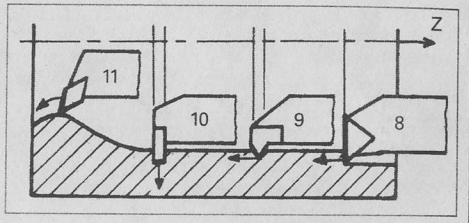


FIGURE 15.10 Schémas des principaux outils de tournage d'intérieur.

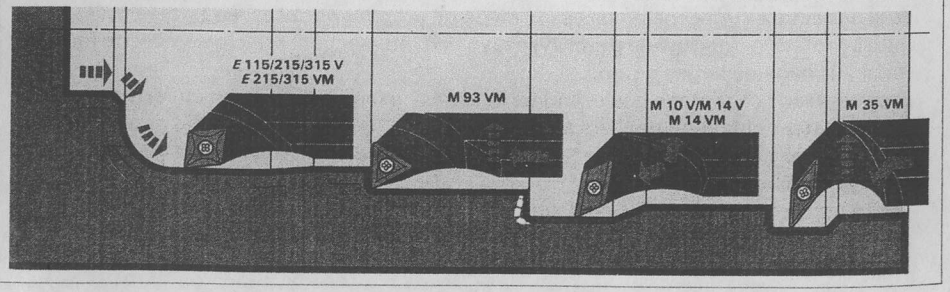


FIGURE 15.11 Outils à copier d'intérieur. *Doc. Stellram*

2.4 Matériaux outils

La partie active des outils est en : carbures métalliques (généralement) revêtus ou non, acier rapide supérieur revêtu TIN ou non, oxyde d'alumine.

Outils en carbure métallique

Constitués d'une plaquette fixée mécaniquement sur le corps d'outil porte-plaquette (fig. 15.12).

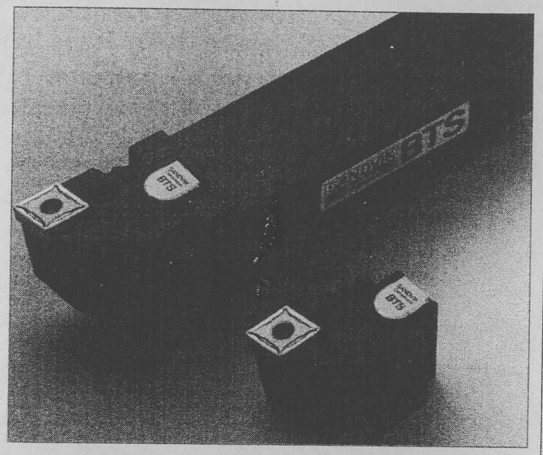


FIGURE 16,12
Outil de tournage d'extérieur à plaquette carbure avec support à changement rapide.
Doc. Sandwik Coromant

Porte-plaquettes

Normalisés NF E 66.311 à 344, et définis par 12 symboles plus 2 complémentaires pour le fabricant, identifiés par des lettres et des chiffres (fig. 15.13).

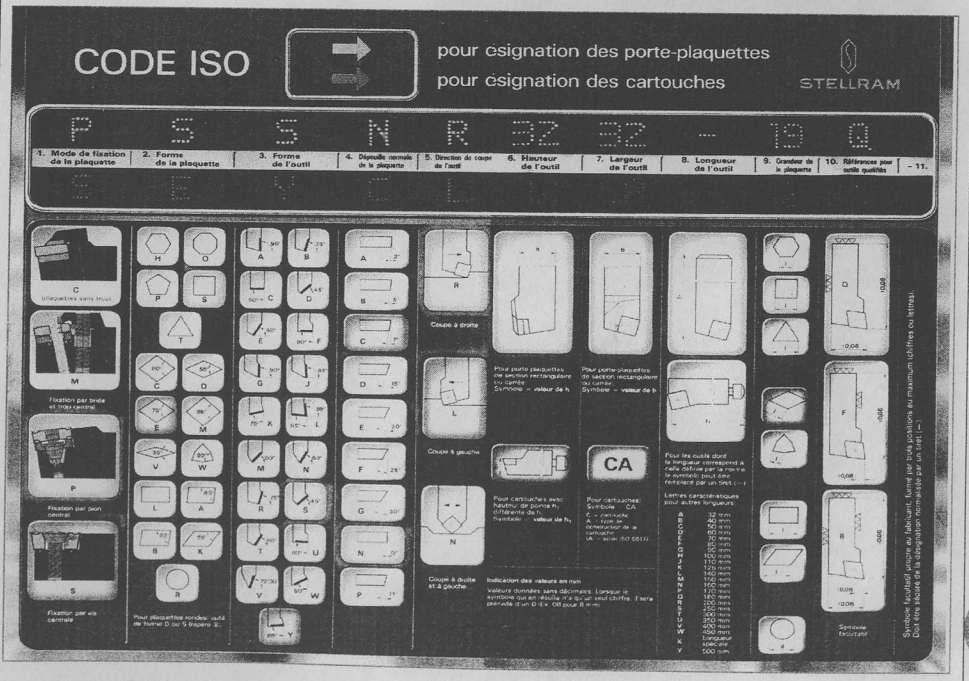


FIGURE 15.13 Désignation normalisée des outils porte-plaquettes de tournage. *Doc. Stellram*

Plaquettes carbure

Normalisées NF E 66.310, et définies par 7 symboles plus 2 optionnels et 2 complémentaires pour le fabricant, identifiées par des lettres et des chiffres (fig. 15.14).

Type de plaquette. Défini par 4 lettres.

Dimensions de plaquette. Définies par des chiffres. À choisir en fonction de la section du copeau (ébauche).

Longueur d'arête de coupe. À déterminer en fonction de la profondeur de passe et de l'angle de direction d'arête K_r.

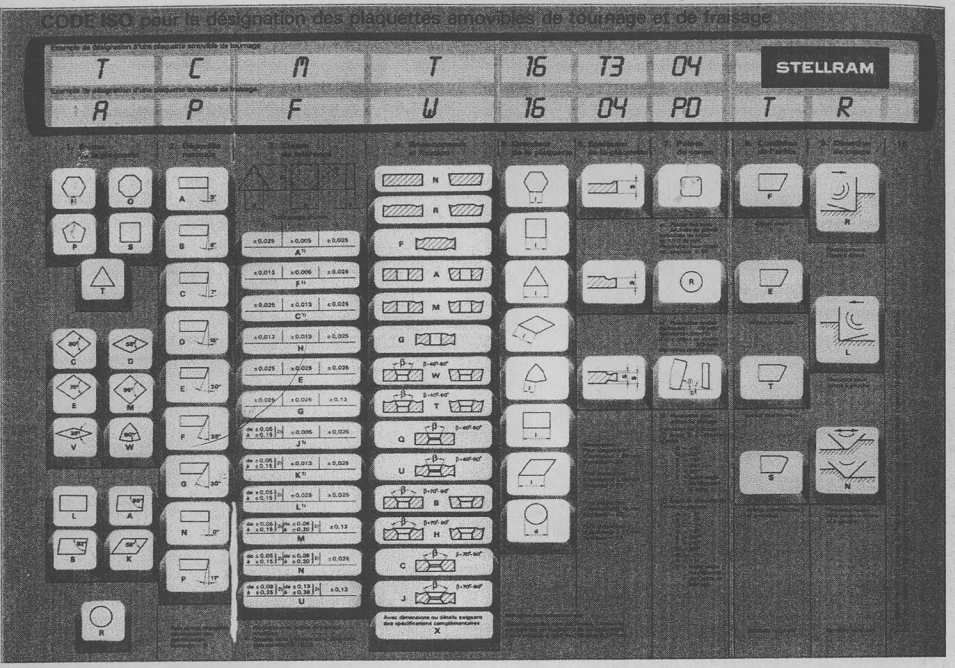


FIGURE 15.14 Désignation normalisée des plaquettes de tournage. *Doc. Stellram*

Outils en acier rapide

Utilisés pour travaux unitaires et en outils de forme.

Les petits outils sont réalisés dans des barreaux rectifiés (en ARS) (fig. 15.15).

Outils en oxyde d'alumine

Utilisés pour : usinage de précision, tournage d'intérieur (alésages longs).

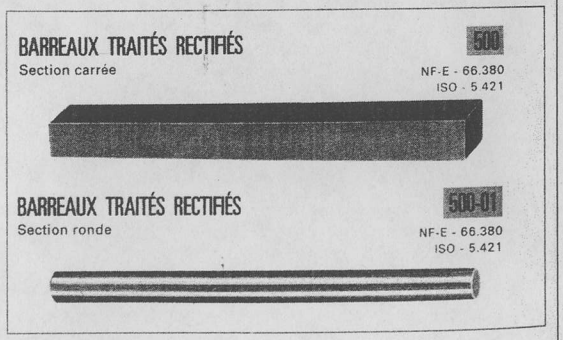


FIGURE 15.15 Barreaux traités rectifiés □ 4 à 25, h11 ; Ø 3 à 20, h8. *Doc. Leclerc*

3. Vitesse d'avance

Indiquées en mm/tour (fig. 15.16).

La valeur des avances varie de 1/10 de mm à quelques mm en fonction : des conditions d'utilisation, du rayon de bec d'outil, de l'état de surface à obtenir.

ÉBAUCHE

Choisir un rayon de bec le plus grand possible afin d'obtenir une arête de coupe résistante ; choisir un plus petit rayon s'il existe un risque de vibrations.

RECOMMANDATIONS

rayon (r) mm	0,4	0,8	1,2	1,6	2,4
avance max f mm/tr -	0,25 – 0,35	0,40 – 0,70	0,50 – 1,00	0,70 – 1,3	1,0 – 1,8

FINITION état de surface

Etat de surface Ra µm	H µm	Rayon de Plaquette 0,4	0,8	1,2	1,6	2,4
		Avance mm/r				
0,6	1,6	0,07	0,10	0,12	0,14	0,17
1,6	4	0,11	0,15	0,19	0,22	0,26
3,2	10	0,17	0,24	0,29	0,34	0,42
6,3	16	0,22	0,30	0,37	0,43	0,53
8	25	0,27	0,38	0,47	0,54	0,66
32	100				1,08	1,32

Etat de surface Ra µm	H µm	Diamètre (Plaquettes rondes) 10	12	16	20	25	32
		Avance mm/r					
0,6	1,6	0,25	0,28	0,32	0,36	0,40	0,45
1,6	4	0,40	0,44	0,51	0,57	0,63	0,71
3,2	10	0,63	0,69	0,80	0,89	1,00	1,13
6,3	16	0,80	0,88	1,01	1,13	1,26	1,43
8	25	1,00	1,10	1,26	1,42	1,41	1,79
32	100	2,00	2,20	2,54	2,94	3,33	3,59

FIGURE 15.16 Vitesses d'avance conseillées en tournage avec outils carbure. *Doc. Sandwik Coromant*

3.1 Grandes avances

Travaux d'ébauche et de surfaçage.

L'avance/tour admise est f = 0,5 à 0,75 rayon de bec.

Associer à une grande avance : angles de direction κ_r 90° et de taillant ϵ_r = 60 à 90° (robustesse du bec).

3.2 Avances de finition

Associer pour obtention d'un état de surface précis : faible rayon de bec à une avance réduite (de 0,4 à 0,05 mm/tr).

3.3 Rayon de bec

Ébauche. À choisir le plus grand possible : rigidifie l'arête de coupe au voisinage du bec, avec utilisation d'une grande avance.

Rayon de bec r_ϵ = 1,2 à 1,6 mm.

4. Section de copeau

Usure rapide en dépouille

- Vitesse de coupe trop élevée
- Nuance avec résistance à l'usure trop faible
- Forte usure résultant d'une déformation plastique

Usure rapide en cratère

- Vitesse de coupe trop élevée
- Avance trop faible
- Nuance avec résistance à l'usure trop faible

Écaillage

- Arête trop fragile
- Vibrations
- Améliorer la stabilité
- Choisir une nuance plus tenace

Rupture du tranchant

- Stabiliser le poste de travail (machine, pièce, outil)
- Choisir une nuance plus tenace

Arête rapportée

- Vitesse de coupe et avance trop faibles
- Augmenter la température sur l'arête
- Augmenter l'angle de coupe

La section maximale du copeau est conditionnée par : la puissance de la machine, la rigidité et le maintien de la pièce (pas de vibrations pièce ou outil provoquant un état de surface défectueux), les conditions de coupe (fig. 15.17).

En ébauche, choisir une section rectangulaire de copeau pour une profondeur de passe donnée : limite l'engagement d'arête réduisant les possibles vibrations, avec $K_r = 90°$ (fig. 15.18).

Si nécessaire, définir plusieurs trajectoires pour usiner une forme, avec un outil de $K_r \cong 90°$ (fig. 15.19).

FIGURE 15.17
Types d'usures des plaquettes carbure et correction à apporter.
Doc. Sandwik Coromant

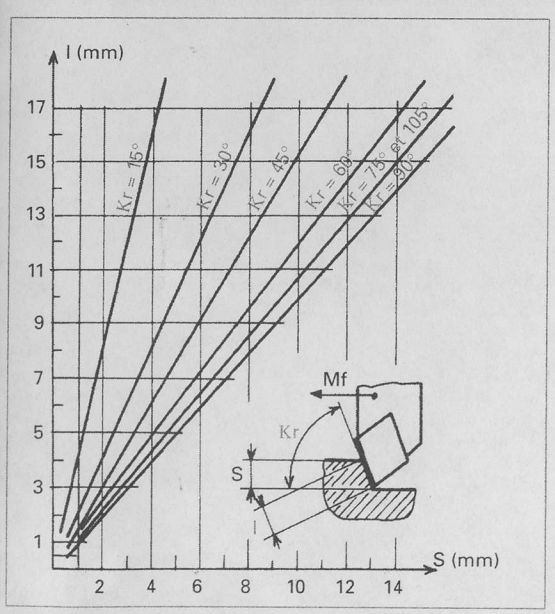


FIGURE 15.18
Longueur d'engagement d'arête en fonction de K_r.

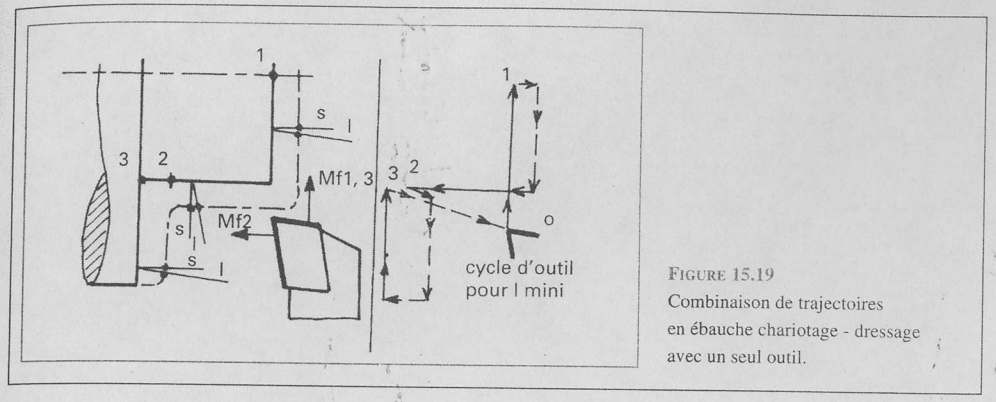


FIGURE 15.19
Combinaison de trajectoires en ébauche chariotage - dressage avec un seul outil.

5. Vitesses de coupe

Elles sont fonction, principalement, de la nature des matériaux, outil et pièce.
Ces vitesses correspondent à une durée de vie d'arête de coupe donnant le meilleur rapport coût d'arête-débit de copeaux, soit :
– carbures métalliques : 15 mm.
– aciers rapides : 60 mm.

5.1 Différents procédés de filetage

Pour usinage d'une série de pièces avec la même arête de coupe... : appliquer la relation $V_0 . t_0 = V_1 . t_1$. avec V_1 = vitesse recommandée par le fabricant.

5.2 Choix des vitesses de coupe et d'avance

Les vitesses de coupe varient de 10 à 1 000 m/min (Usinage Grande Vitesse) selon : principalement matériaux à usiner, possibilités machines, rigidité couple outil-pièce, matériau outil, section de copeaux.
Des tableaux de fabricants d'outils recommandent des vitesses de coupe et d'avance pour utilisation à durée de vie V 15 (carbure) et V 60 (ARS) (fig. 15.20).

Paramètres de coupe pour le tournage
MÉTAUX FERREUX
(pour une durée de vie d'environ 15 mm/arête de coupe)

No ISO	Matière		Force de coupe spécifique ks 0,4 kp/mm²	Dureté Brinell HB	NUANCE P — GC 415			GC 435		
					Avance mm/tr					
						0,4	0,2		0,4	0,2
					Vitesse de coupe m/min.					
P1	Acier au carbone non allié	C=0,15 %	190	125		345	430		220	280
P2		C=0,35 %	210	150		315	390		170	220
P3		C=0,70 %	200	180- 250		270	330		135	175
P4.1	Acier allié	Recuit	210	125-200		275	340		135	175
P4.2		Cémenté trempé	250	200- 275		215	285		110	140
P4.3		Cémenté trempé	275	220- 325		170	230		90	115
P4.4		Cémenté trempé	300	325-450		135	185		70	90
P5.1	Acier inoxydable Recuit, ferritique	Martensitique/ Ferritique	230	150-270		215	270		170	210
P5.2		Austénitique	260	150-220		175	210		135	165
P6.1	Acier coulé	Non allié	180	150		205	290		120	150
P6.2		Faiblement allié	210	150-250		150	180		80	100
P6.3		Fortement allié	240	160-250		145	175		80	95

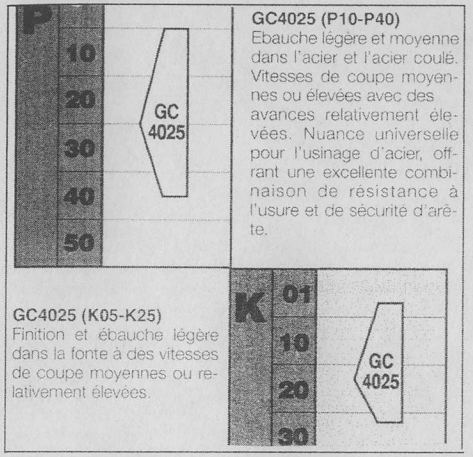
Paramètres de coupe pour le tournage
MÉTAUX NON FERREUX
(pour une durée de vie d'environ 15 mm/arête de coupe)

No ISO	Matière		Force de coupe spécifique ks 0,4 kp/mm²	Dureté Brinell HB	NUANCE K — GC 415			GC 435		
					Avance mm/tr					
						0,5	0,2		0,6	0,3
					Vitesse de coupe m/min					
K1.1	Fonte malléable	Ferritique	110	110- 150		240	305		90	110
K1.2		Perlitique	100	150- 270		125	185			
K2.1	Fonte grise, faible résistance		110	150- 220		235	375		90	105
K2.2	Fonte grise à haute résistance		150	200- 330		165	270		65	75
K3.1	Fonte nodulaire GS	Ferritique	110	125- 230		150	205			
K3.2		Perlitique	180	200- 300		135	185			
K4										
K5.1	Cuivre électrolytique		110	50- 85					210	280
K5.2	Bronze Alliages de laiton	Alliage de plomb	70	80- 150					280	335
K5.3		Laiton, laiton rouge	75	60- 110					200	240
K5.4		Phosphore, bronze	175	85- 110					130	165
K6.1	Alliages d'aluminium	Non traitables à chaud	50	30- 80					1000	1300
K6.2		Traitables à chaud	70	80- 120					270	350
K7.1	Alliages d'aluminium (coulés)	Non traitables à chaud	75	100					225	320
K7.2		Traitables à chaud	90	130					130	190
K8	Matériaux divers	Caoutchouc dur							230	
K9		Fibre							170	
K10		Plastiques durs							350	

FIGURE 15.20
Vitesses de coupe recommandées en tournage avec outils carbure.
Doc. Sandwik Coromant

5.3 Plaquettes revêtues en multicouches

Avec revêtement Ti, Al_2O_3... très résistantes à l'usure avec un substrat à forte ténacité pour usinage : des aciers et fontes à vitesse extrême (des machines), des aciers de grande dureté, des fontes nodulaires (fig. 15.21).



Nuance universelle GC 4025 → P10 à P40 et K01 à K30		Avance mm/tr	
		0,1—0,4—0,8	
		Vitesse de coupe m/min	
P	**Acier au carbone non allié**		
01.1	**C=0,15%**	450—310—215	
01.2	**C=0,35%**	410—280—195	
01.3	**C=0,60%**	360—250—170	
	Acier faiblement allié		
02.1	Recuit	330—230—155	
02.2	Trempé et revenu (HB 275)	225—160—120	
02.2	Trempé et revenu (HB 300)	205—140—110	
02.2	Trempé et revenu (HB 350)	160—125— 95	
	Acier fortement allié		
03.1	Recuit (HB 200)	290—195—145	
03.2	Trempé (HB 325)	130— 90— 70	
	Acier inoxydable, recuit		
05.1	Martensitique/ferritique	280—215—170	
	Acier coulé		
06.1	Non allié	235—165—125	
06.2	Faiblement allié	200—135— 95	
06.3	Fortement allié	175—120— 85	
K	**Fonte malléable**		
07.1	Ferritique	270—235—165	
07.2	Perlitique	190—150— 85	
	Fonte		
08.1	A faible résistance	360—265—150	
08.2	A forte résistance	230—160— 90	
	Fonte nodulaire GS		
09.1	Ferritique	255—175—120	
09.2	Perlitique	185—125— 85	

FIGURE 15.21 Vitesses de coupe recommandées en tournage avec outil carbure multimatériaux métalliques (nuance universelle).
Doc. Sandwik Coromant

5.4 Vitesses de coupe réduites

Utilisation d'outils : de résistance réduite (tronçonnage, alésage de petits diamètres...) ; travaillant à avance rapide (filetage à grand pas).

Puissance nécessaire à la coupe PW

lle est déterminée avec une approximation suffisante, en considérant essentiellement l'effort e coupe F_v.
a vitesse d'avance V_f est négligeable devant la vitesse de coupe V_c, et la vitesse de pénétra-on est nulle (fig. 15.22).
uissance nécessaire à la coupe
$_v = Fc_N . V$ m/min/60 $= K_a . f . s . V/60$,
vec
c_N = Effort de coupe tangentiel en newtons.
m/min = Vitesse de coupe en m/min.
$_a$ = Pression spécifique de coupe N/mm^2
g. 15.20).
= Avance en mm/tour.
= Profondeur de passe en mm.
uissance absorbée par la machine P_u, selon
on rendement : soit $P_u = P.\eta$.
le peut être déterminée à l'aide d'un graphe
nçu par un fabricant d'outils.

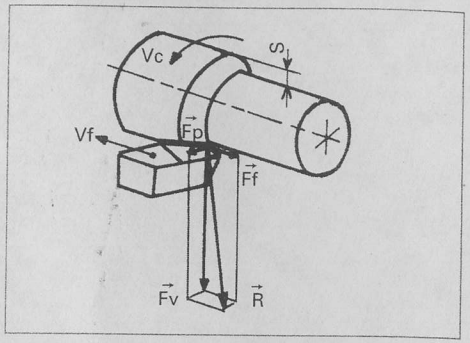


FIGURE 15.22 Efforts de coupe en tournage.

Mise en œuvre

1 Pièces cylindriques courtes et plates

ièces cylindriques courtes. De longueur ≅ à leur plus and diamètre extérieur.
es sont maintenues d'un seul côté sur la machine (en néral non-déformation sous les effets de coupe) don-nt libre accès aux outils.
ièces plates. De profil extérieur cylindrique ou non. aintenues pour laisser libre accès aux outils (fig. .23).

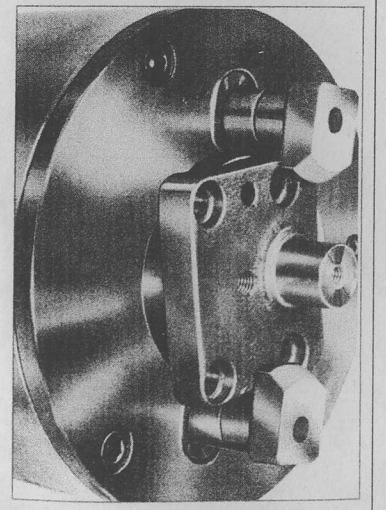
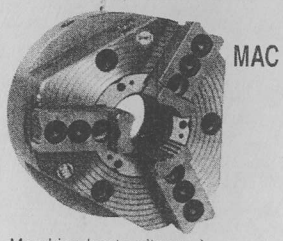


FIGURE 15.23
Pièce plate maintenue en mandrin à serrage axial.
Doc. S.M.U.

Isostatisme

Généralement ces pièces sont maintenues « en l'air » (appui-plan sur l'arrière, fixation sur profil) par : mandrin 3 à *n* mors concentriques, porte-pièce spécifique (fig. 15.24).

FIGURE 15.24
Mandrin à serrage 3 mors concentriques
Doc. Gammet



Mandrins haute vitesse à compensation de force centrifuge

Usinage

S'effectue en longitudinal (chariotage, avec Z) ou/et transversal (dressage, axe X) d'extérieur et d'intérieur (fig. 15.25).
Production à partir d'un brut (forgé, moulé, débité) ou directement dans la barre.
Usinages simultanés d'outils. Un outil d'extérieur et un d'intérieur peuvent être utilisés simultanément : sur machine à CN bitourelle porte-outil indépendante (fig. 15.26).

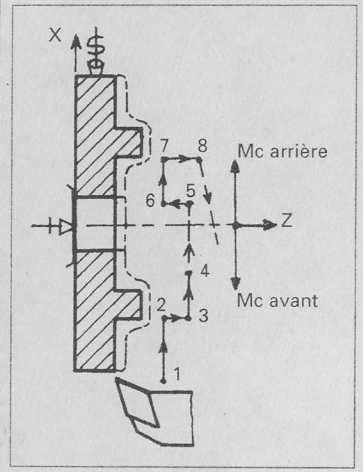


FIGURE 15.25 Cycle de tournage d'intérieur et d'extérieur d'une pièce cylindrique plate, en suivi de profil avec un seul outil.

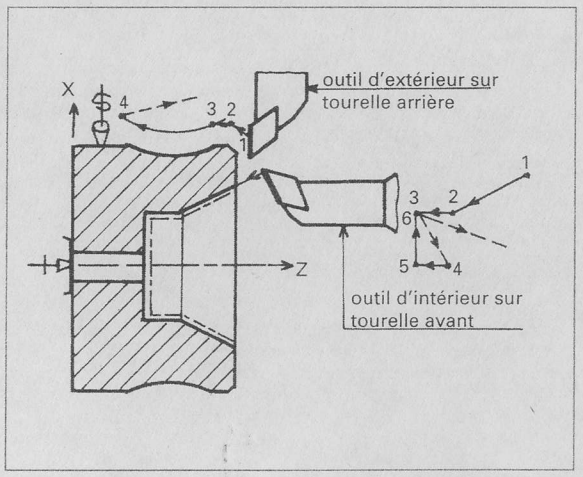
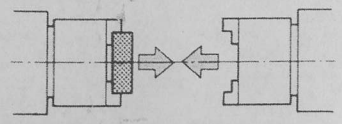
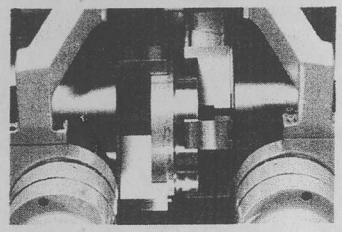


FIGURE 15.26 Tournage simultané d'extérieur et d'intérieur d'une pièce courte sur tour bitourelle.

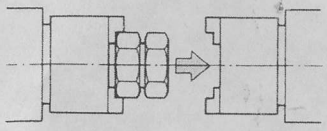
Usinage suivant les deux sens.
En 2 sous-phases. Par retournement de la pièce : reprise sur forme usinée.
Dans la phase. Sur tour bibroche (2 broches en opposition) à vitesses synchronisées : transfert automatique de la pièce d'une broche à l'autre et opérations simultanées d'usinage sur deux pièces (fig. 15.27).
Sur tour bibroche parallèle. Transfert automatique à l'aide d'un préhenseur de pièce équipant la tourelle porte-outil.



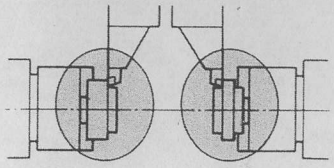
1ère broche 2ème broche



Transfert automatique de la pièce d'une broche à l'autre.



Orientation synchrone des 2 broches.



1ère broche 2ème broche

Opérations simultanées

IGURE 15.27 Usinage de pièces courtes sur tour bitourelle en opposition « multiplex ». *Doc. Mazak*

Pièces usinées dans la barre

près usinage d'une pièce, débit par util à tronçonner : à la cote finale ou on (reprise de la pièce).

n titre-barre équipant la tourelle orte-outil assure la production auto- atique (fig. 15.28).

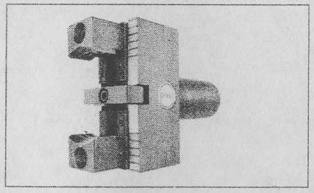


FIGURE 13.28
Tire-barre pour équiper tourelles porte-outils.
Doc. Gamet

Pièces volumineuses courtes

sinées sur tours verticaux, la pièce repose par gravité sur le plateau, facilitant sa mise en osition (fig. 15.29).

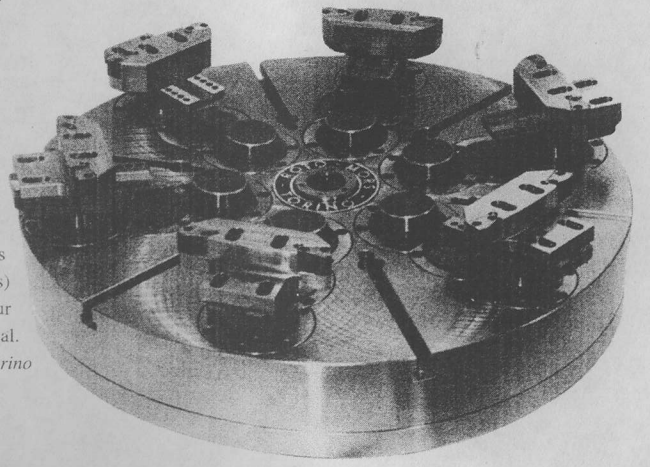


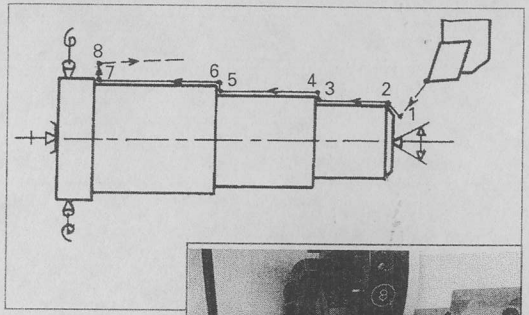
FIGURE 15.29
Mandrin à mors autocentrants (à griffes avec appuis) de grand diamètre pour tour vertical.
Doc. Roto-Mors-Torino

7.2 Pièces cylindriques longues

De longueur supérieure au diamètre extérieur.

Isostatisme

Maintien mixte (aux deux extrémités de la pièce) : positif côté mandrin (entraînement) et soutien côté opposé (pointe) (fig. 15.30).



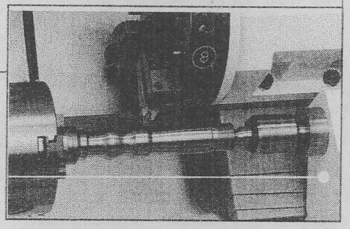


FIGURE 15.30
Isostatisme des pièces longues (cas général) en tournage.
Doc. Réalméca

Usinage

Les efforts de coupe ne doivent pas provoquer un fléchissement de la pièce : risque de déformation temporaire avec obtention d'un défaut de cylindricité (forme en tonneau), éjection de la pièce, rupture d'outil.

Usinage-ébauche. Avec section maxi des copeaux : flèche admise $f \leq 1/4$ IT du diamètre à obtenir.
Choisir l'angle $K_r = 90°$, annulant l'effort de pénétration (fig. 15.22 et 15.31).

Usinages simultanés d'outils. Deux outils peuvent travailler simultanément en opposition sur la pièce : sur machine à CN bitourelle (axes XZ et UV) (fig. 15.31).

Usinage en bout. Soutenir la pièce, côté à usiner, par une lunette fixe laissant libre accès aux outils (fig. 15.32).

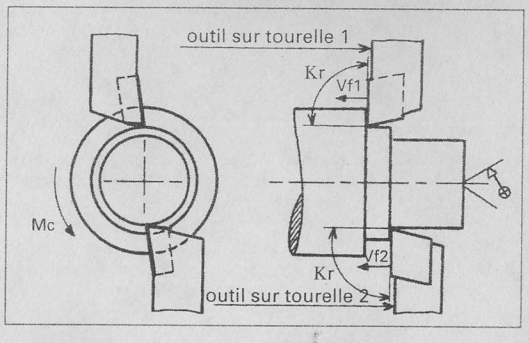
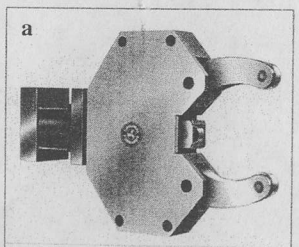


FIGURE 15.31
Tournage simultané avec deux outils en opposition sur tour bitourelle.



avec levier pivotant supplémentaire pour le chargement automatique de la pièce à usiner. Livrable en 6 tailles, vérin à l'arrière sur modèle normal, pour graissage manuel (LAE) ou graissage centralisé (LAZ).

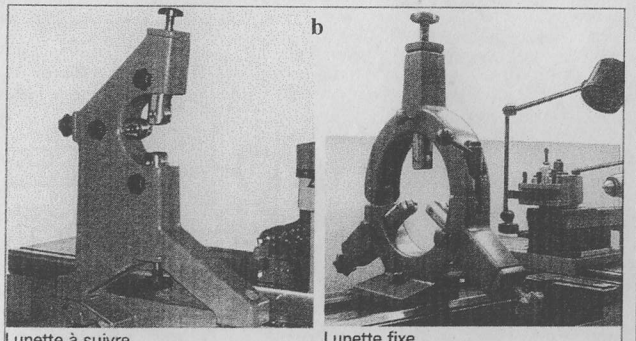


FIGURE 13.32 Lunettes de soutènement de pièces cylindriques en tournage.
a. autocentrante (*doc. Forkardt*) b. fixe et à suivre (*doc. Boehringer*)

Pièces très longues

D'un grand rapport longueur/diamètre, à soutenir : complémentairement dans la partie centrale par une lunette fixe et par une lunette à suivre (au droit de l'outil : opposition aux vibrations) (fig. 15.32a).

Pièces longues volumineuses

De plusieurs mètres de longueur. À usiner en maintien mixte avec plusieurs lunettes fixes et une lunette à suivre.
Pièces à plusieurs lignes d'axes (grands vilebrequins) sont usinées sur tour spécifique à l'aide de lunettes à double axe de rotation.

Pièces de très petit diamètre

De quelques mm ; tournage micrométrique.
À usiner sur tour de décolletage à poupée mobile : l'action de coupe s'effectue au droit du maintien (par pince de serrage) ; l'avance est affectée à la pièce.

Pièces de profil quelconque

À usiner en suivi de profil sur tour à CN ou tour à reproduire, avec outil losangé bidirectionnel (choisir ϵ_r maxi rigidifiant le bec) (fig. 15.33).
Limite de profil usiné. ϵ_r + 4 à 6° (dépouille latérale par arrête de coupe : 2 à 3°) pour maintien du contact bec/profil pièce impératif (fig. 15.35 c).

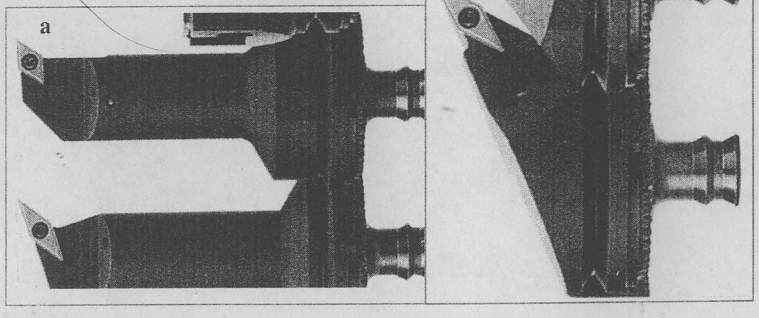


FIGURE 15.33
Outil à plaquette losangé pour tournage en suivi de profil.
a. outils d'intérieur
b. outils d'extérieur
Doc. Flexible Tooling system

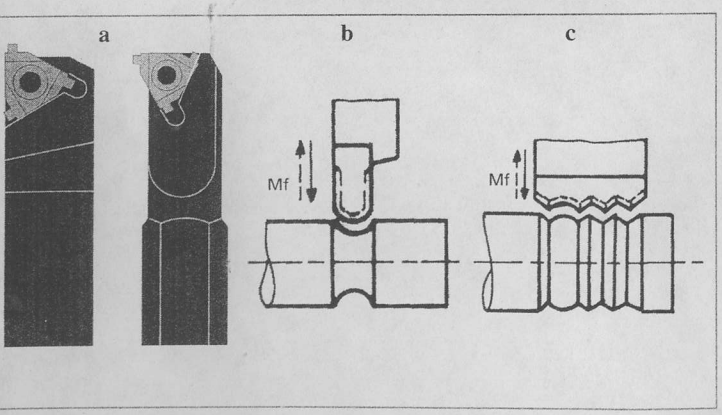


FIGURE 15.34
Outils de forme pour fonçage de formes courtes
outil à gorge « Vardex »
Doc. Vargus

7.3 Opérations de fonçage de formes courtes

Gorges, rainures, profils quelconques.
À réaliser généralement avec outils spécifiques aux profils à obtenir, en avance par plongée (fig. 15.34).
À systématiser en décolletage des profils courts : production maximale.

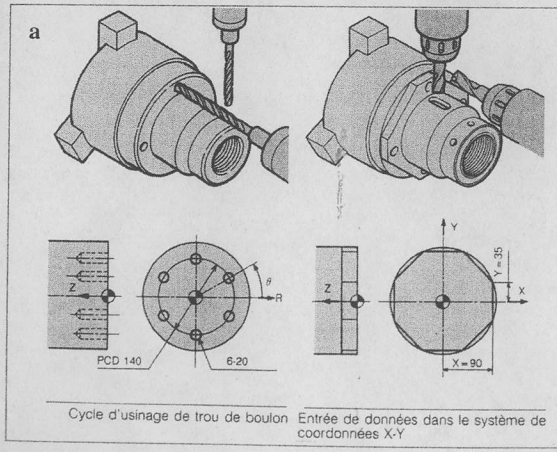
7.4 Opérations de filetage

Généralement réalisées en phase tournage, sauf : contrainte de donneur d'ordre (filetage par déformation), pièces à prédominance de filetage (pièces longues totalement filetées...) (voir « Procédés de filetage »).
Différents filetages sont réalisables, sur l'avant ou l'arrière de la pièce installée, en cycle automatique (multipasses) sur machines à CN : cylindriques, coniques, multifilets, transversaux, suivant profils curvilignes...

Nota : Sur tour séquentiel à charioter et fileter : réalisation de filetages cylindriques, en cycle semi-automatique avec vitesse d'avance lente.

7.5 Opérations de perçage et fraisage

Réalisables sur machines à CN équipées de l'axe C (indexage de la broche porte-pièce) et d'outils tournants (en position parallèle, perpendiculaire ou inclinée par rapport à l'axe-pièce) (fig. 15.35).
Opérations à systématiser en décolletage (grande série, petites pièces difficiles à reprendre) : productivité, non-reprise de pièce (sauf sur la machine, automatiquement, avec appareillage spécifique).



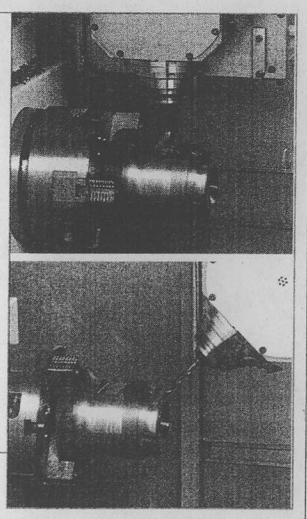


FIGURE 15.35 Opérations de perçage et fraisage sur centre de tournage
a. exemple d'utilisation axe C sur CT Mazatrol T32 *(doc. Mazak)*
b. exemple de fraisage et perçage *(doc. Somab)*

.6 Opérations de suivi de profil

éalisables sur machines à CN et tours à eproduire.

lachines à CN (tours et centres de tour- age). Obtenues par combinaison des mou- ements Z et X.

avance réelle fr tout au long du profil à btenir est celle programmée *f* : le calcula- eur détermine Δ Z et Δ X pour chaque valeur e *f* (fig. 15.36).

our à copier.

btention à l'aide d'un modèle (gabarit nétallique).

avance réelle f_r varie selon la pente à uivre, l'avance-machine f étant suivant Z ou (longitudinal ou transversal), avec l'axe du ylindre reproducteur. (fig. 15.37) :

erpendiculaire à l'axe pièce, $f_r > f$, en des- ente et montée de pentes avec impossibilité e réaliser des épaulements.

ncliné sur l'axe pièce : si l'outil descend une ente, $f_r > f$; si l'outil monte une pente, $< f$.

our éviter des avances excessives : usiner n remontant les pentes importantes.

n descente de pente : choisir l'avance- achine *f* telle que l'avance réelle f_r soit ans les limites d'état de surface admises.

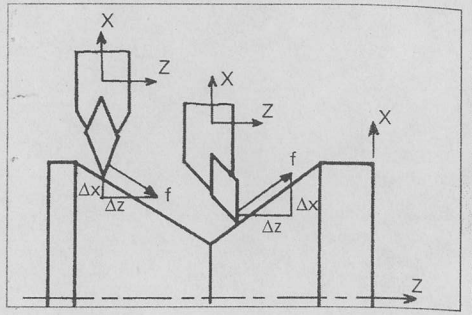


FIGURE 15.36 Avances réelles en suivi de profil sur tour à CN (fr = f).

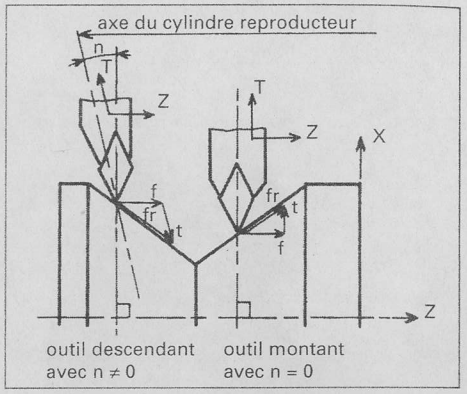


FIGURE 15.37 Avances réelles en suivi de profil sur tour à copier (fr ≠ f)

7 Formes intérieures

es outils agissent successivement (perçage, ésage...)

orps d'outil de section maxi, de longueur à miter au minimum (voir chapitre « Procédés alésage »).

laintien auxiliaire en bout de pièce longue ar : lunette fixe, bague tournante (précision, ection de pièce non cylindrique) (fig. 15.38).

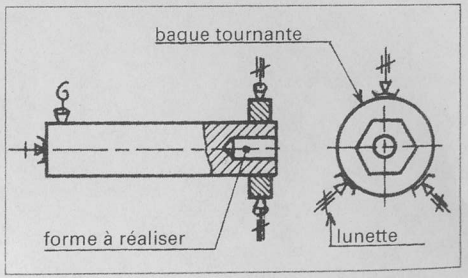


FIGURE 15.38 Maintien auxiliaire de pièce longue pour usinage en bout.

7.8 Pièces brutes de forgeage et moulage

Pièces comportant essentiellement des formes cylindriques (d'extérieur et/ou d'intérieur) à usiner :

Unitaire à petites séries. Sur tour monobroche, pièce maintenue en mandrin ou porte-pièce.

Grande série à illimitée. Sur tour multibroches : chaque broche porte-pièce constitue une sous-phase.

Usinage total de la pièce après passage devant toutes les stations moins une (poste de chargement-déchargement).

7.9 Pièces cylindriques multiformes

Comprenant tournage, perçage, fraisage, filetage : à usiner sur centre de tournage, dans la phase, en 1 ou 2 sous-phases (reprise pour usinage arrière).

7.10 Pièces cylindriques volumineuses

Plates et courtes (0,50 m à plusieurs mètres de diamètre) : à usiner sur centres de tournage verticaux, en totalité dans la phase (1 ou 2 sous-phases) avec des porte-outils orientables.

7.11 Pièces usinées en décolletage

Usinage « en l'air », dans la phase, de pièces petites à très petites (∅ 1 à ≅ 32 mm, longueur maxi 70 à 250 mm, selon les machines) prises dans la barre ou le fil, sans support auxiliaire.

Pièces courtes, usinées sur tour à poupée fixe, avec reprise pour usinage arrière.

Pièces longues, usinées sur tour à poupée mobile : usinage au droit du nez de pince de maintien avec avances données à la pièce (la barre est translatée).

Opérations de filetage. En multipasses sur tour à décolleter à CN ; en monopasse (filière, taraud) à vitesses différentielles (en temps masqué).

Opérations de tronçonnage de pièces finies. Sans action simultanée d'un autre outil (évite un effort éjectant la pièce avant fin de tronçonnage).

7.12 Opérations de moletage

Réalisation de stries parallèles ou croisées sur des surfaces cylindriques préalablement usinées, par fluage de la matière sous une pression exercée par l'outil sur la forme initiale.

Outils. Conçus à une, deux ou plusieurs groupes de 2 molettes (tête revolver).

Outil à une molette, pour tour à décolleter, et à CN, pour : moletage court en particulier ; encombrement réduit. (fig. 15.39)

Outil à deux molettes agissant du même côté de la forme pour : tous types de tour (fig. 15.40).

Avec molettes inclinées, agissant avec l'extrémité des arêtes, produisant un relatif fraisage (diminution effort de pression) (fig. 15.41).

Outil à deux molettes opposées diamétralement à la pièce, avec : réglage du diamètre et de la profondeur de déformation, indication du diamètre à moleter, arrosage sur les molettes (fig. 15.42).

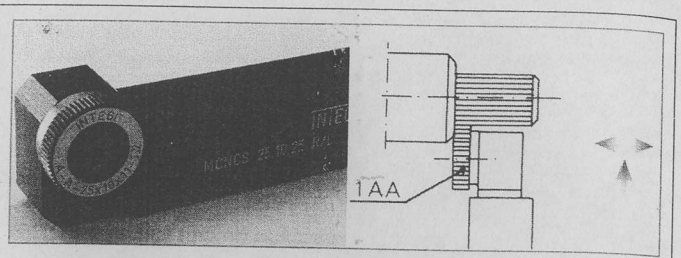


FIGURE 15.39 Outil à moleter simple, jusqu'à la face. *Doc. Intégi*

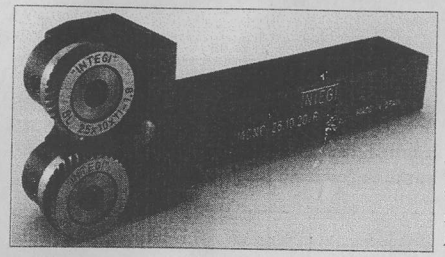


FIGURE 15.40
Outil à moleter double molette.
Doc. Intégi

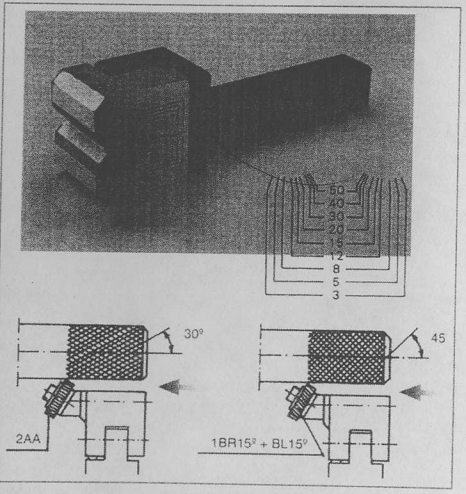


FIGURE 15.41 Outil à moleter double molette à tête réglage aux différents diamètre *Doc. Intégi*

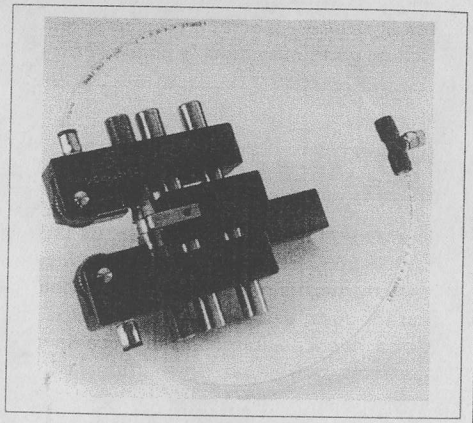


FIGURE 15.42 Outil à moleter à double action compensée, capacité ø 6 à 50. *Doc. Intégi*

7.13 Opérations de centrage – dressage

Mise en longueur et usinage en bout des ébauches de pièces cylindriques, avant maintien aux extrémités pour tournage.

Optimisation systématique par usinage simultané : centrage, dressage, chanfreinage, cylindrage court avec outillage porte-outil (fig. 15.43).

Utilisation en toutes séries.

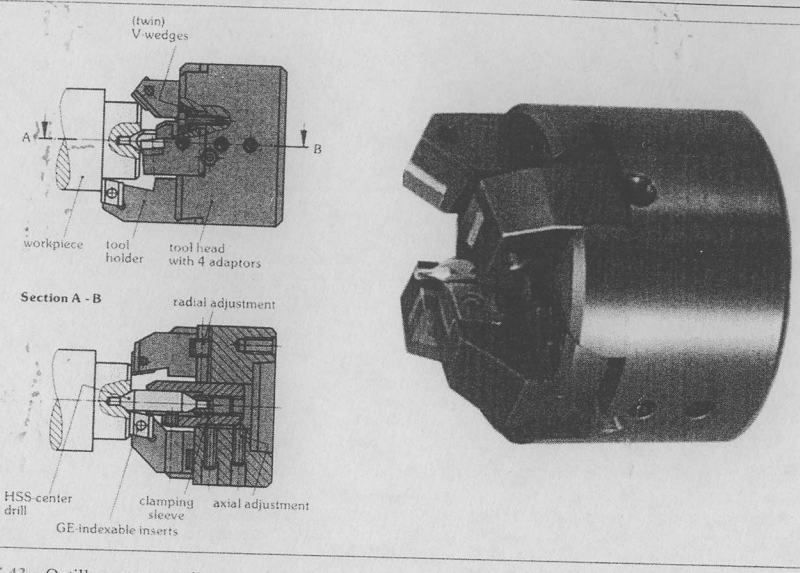


FIGURE 15.43 Outillage porte-outil de centrage-dressage. *Doc. Guhring*

8. Appareillages support-pièce

Doivent assurer : maintien en position de la pièce avec : coaxialité surface de maintien/surfaces usinées ; entraînement en rotation (mouvement de coupe) ; opposition aux efforts de coupe (non-éjection de la pièce maintenue d'un seul côté) ; équilibrage porte-pièce/pièce.
Différents appareillages. Mandrins à serrage concentrique, pinces de serrage, pointes tournantes et d'entraînement, mandrins et douilles de reprise, porte-pièce.

8.1 Tournage en l'air

Pour pièces courtes et plates, utiliser : mandrins à serrage concentrique, porte-pièces, douilles et mandrins de reprise.

Mandrin à serrage concentrique

3 à 6 mors à ouverture-fermeture automatique (MOCN) ou manuelle : 3 mors pour pièces cylindriques ; 4 à 6 mors pour pièces plates ou courtes de profil non cylindrique.
Mors durs (trempés, rectifiés). Prise de pièce sur brut, de section cylindrique : grande capacité, pour maintien d'extérieur et d'intérieur, avec réglage rapide et précis des mors (fig. 15.44).
Précision de concentricité en usinage répétitif : 0,1 à 0,3 mm.

Mors doux (acier dur, non trempé). Reprise de pièce sur diamètre usiné, d'extérieur et d'intérieur : les mors sont usinés au diamètre de la forme de maintien (fig. 15.44).
Précision de concentricité en usinage répétitif : 0,02 à 0,04 mm.

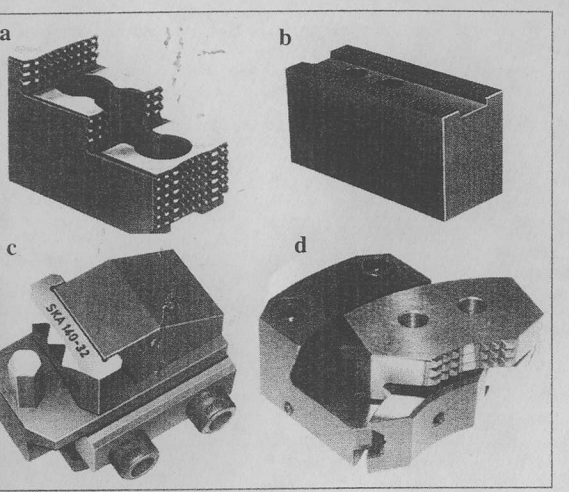


FIGURE 15.44
Mors de mandrins de tournage
fig. a, b, c (*doc. Forkardt*) ;
fig. d (*doc. Rotomors*).
a. Mors durs rapportés
b. Mors doux rapportés
c. Mors à griffes à garniture interchangeable
d. Mors à changement rapide

Entraînement des pièces

Obtenu par adhérence. Les effets de fixation, par serrage ponctuel, avec n mors d'un mandrin doivent s'opposer à l'effort de coupe maxi Fc (fig. 15.45).
Selon le nombre de mors du mandrin,

$$n \cdot T \cdot R_m - F_c \cdot R_c = 0,$$

avec T = effort tangentiel ;
R_m = rayon de maintien ;
R_c = rayon maxi de coupe.
Effort normal $N = T/\operatorname{tg}\varphi$, avec tg φ limite du glissement.
Efforts « normaux » à augmenter pour s'opposer aux efforts d'inertie en grande fréquence de rotation.

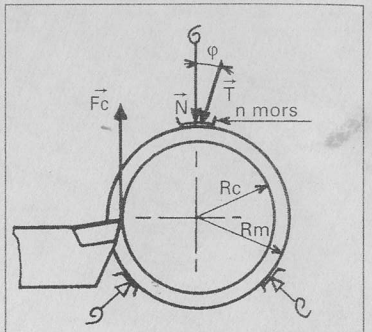


FIGURE 15.45 Schéma d'équilibre efforts de coupe et de maintien.

Porte-pièces

Spécifiques pour pièces plates en travaux de série : conception en éléments modulaires ou mandrins à serrage axial.

Mandrins à pinces et à expansibilité

Maintien en position avec précision de pièces cylindriques en reprise ou prise d'extérieur ou d'intérieur.
Précision de concentricité de reprise : 0,01 à 0,03 mm.
Pinces à lamelles. Reprise d'extérieur avec des lamelles à serrage individuel : grande plage de diamètres par pince (exemple d'une pince LZK de Forkard : 4,5 à 15 mm) (fig. 15.46 a).
Maintien de pièces déformables (multitude de lamelles).
Mandrins à pinces. Prise de barre, en particulier à risque de déformation. De types normalisé ou à lamelles (fig. 15.46 b).

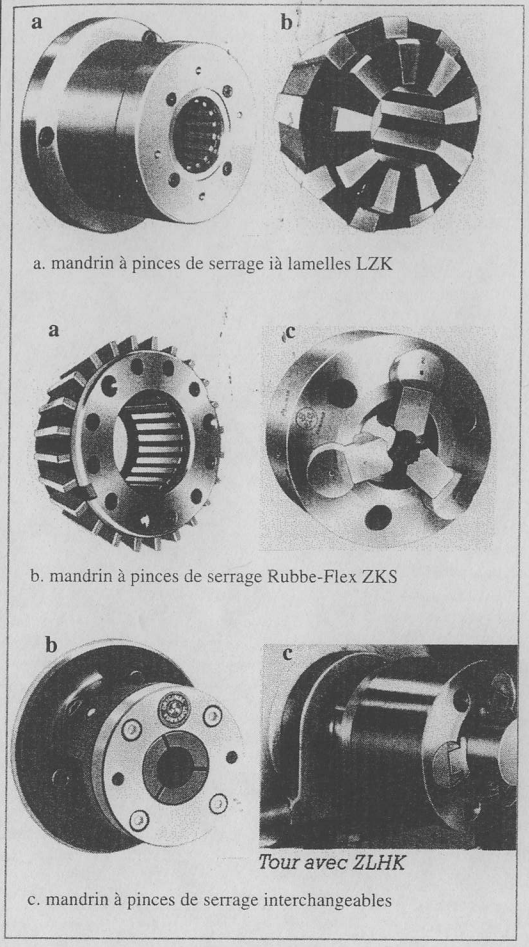


FIGURE 15.46 Mandrins à pinces pour pièces en prise d'extérieur. *Doc. Forkardt*

Prise de pièce brute à serrage par actions radiale et axiale (placage sur butée de longueur) ; mors interchangeables (fig. 15.46 c).
Mandrins expansibles. Lamelles ou plots à déplacement radial : reprise de pièces dans alésage (caractéristiques analogues aux pinces) (fig. 15.47).

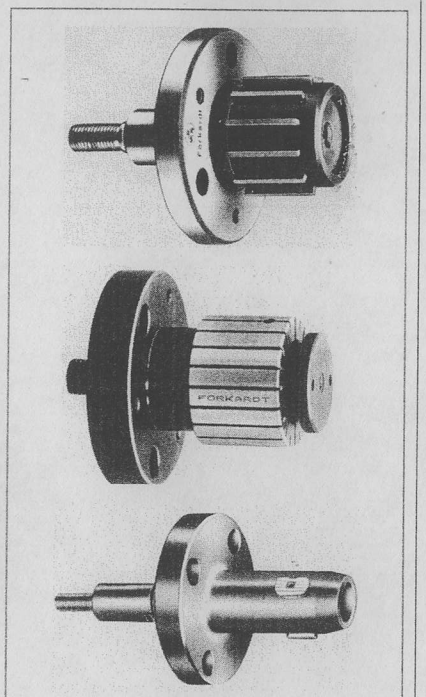


FIGURE 15.47 Mandrins expansibles pour pièces en reprise d'intérieur. *Doc. Forkardt*

8.2 Tournage en mixte

Pour pièces longues, pleines et tubulaires, utiliser : mandrin ou pointe à picots et pointe tournante..., bague tournante, lunette de soutènement.

Mandrin 3 mors et pointe tournante

Entraînement de la pièce par mandrin à une extrémité, soutènement par pointe tournante à l'autre extrémité (fig. 15.48).

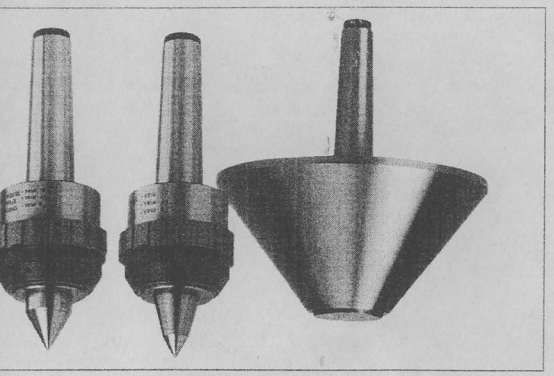


FIGURE 15.48
Pointes tournantes de soutènement pièces longues.
Doc. Röhm

Entraîneur frontal et pointe tournante

ntraînement de la pièce pour : finition de précision sur toute la longueur pièce (sans reprise) pleine ou euse (tubes) ; ébauche à faible section de copeaux (fig. 15.49 et 15.50).

Bagues tournantes

r centres de tournage. À rotation nchronisée avec la broche, en positionnement automatique.
même section que les barres à usir : sur tour à décolleter (fig. 15.38).

Lunettes de soutènement

xes ou « à suivre ».
aintien complémentaire de pièces ngues : opposition aux efforts de upe évitant vibrations et déformation temporaire en cours d'usinage g. 15.32). Auto-centrantes, de tailles férentes.
nette fixe. Contact à la pièce en 3 ints (roulements à billes) sur surce usinée préalablement (portée de nette).
ece de section non cylindrique : aintien par bague intermédiaire.
nette à suivre. Contact en 2 points vé : en appui sur la surface usinée, opposition et se déplaçant avec util qui la précède.

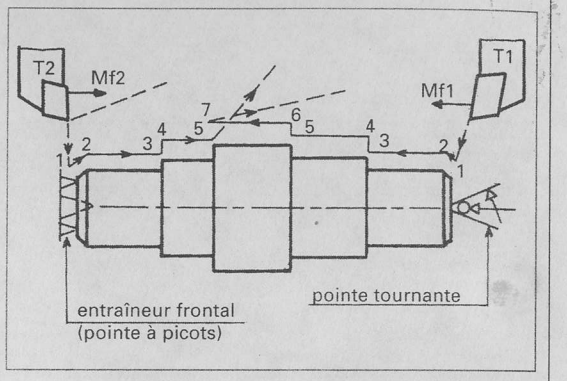


FIGURE 15.49 Tournage total d'une pièce cylindrique épaulée, avec pointe d'entraînement.

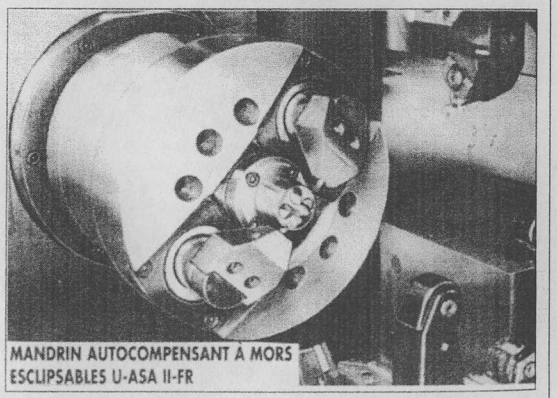


FIGURE 15.50 Mandrin à mors flottants éclipsables avec entraîneur frontal à lames et pointe de centrage. *Doc. Rotomors*

9. Machines

À commande numérique, avec mesure des déplacements en boucle fermée, assurant une excellente précision de répétabilité.
Usinage automatique de toutes pièces dont l'usinage est mémorisé dans la CN (cycles et conditions de coupe de chaque outil utilisé).

9.1 Tours à CN

À 2 axes automatisés XZ, avec tourelle porte-outils.
Programmation. Par icônes définissant les principales formes de tournage (cylindriques, cônes, épaulements, alésages, filetages...) : description du profil-pièce dans l'ordre d'usinage ; la CN définit des conditions d'usinage (à valider ou non) (fig. 15.51).
Par définition géométrique du profil-pièce (FAO...) mémorisés dans la CN : appel de chaque programme correspondant à un type de pièces à produire (production flexible).
Utilisation. Production unitaire à la série de toutes pièces cylindriques.

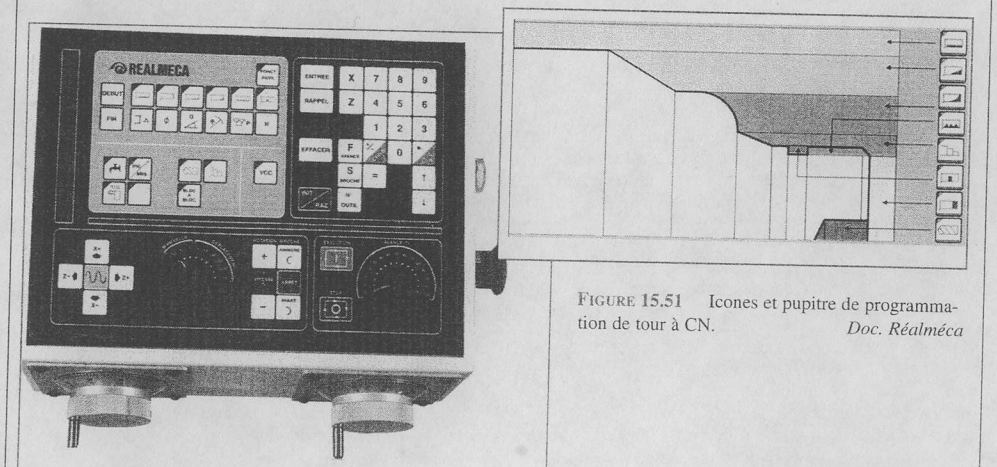
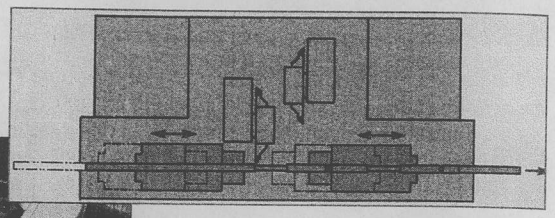


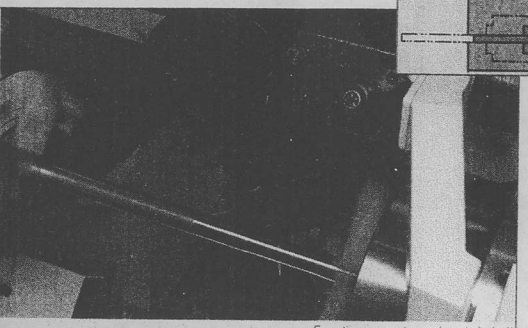
FIGURE 15.51 Icones et pupitre de programmation de tour à CN. *Doc. Réalméca*

9.2 Centres de tournage

De 3 à 7 axes automatisés et synchronisés, avec 1, 2, 4 broches porte-pièces.
Porte-outils. 1 à 2 tourelles ou/et magasin d'outils.
Axes C. Indexage de broche (principale) et synchronisation avec XZ, pour :
Perçage réseau de trous perpendiculaires à l'axe-pièce.
Fraisage linéaire, circulaire, hélicoïdal sur faces et cylindres.

Autres opérations. Selon les machines : filetage à la fraise, tournage polygonal, fraisage de rainures obliques, de dentures longitudinales et frontales.
Sur certains CT, avec axe Y : usinage excentré ; synchronisé avec axe C, taillage de dentures à l'outil-fraise.
Assistance technologique. Autonomie de fonctionnement du CT par : gestion des outils (durée de vie, contrôle de bris, mesure d'usure et compensation de dérive de cote, remplacement d'outil par outil-frère...).
Bibroche en opposition. Synchronisation des 2 broches pour : tournage de pièces longues simultanément suivant les 2 directions, par transfert automatique d'une broche à l'autre (avec bitourelle) (fig. 15.27) ; tournage de pièces très longues par maintien de la pièce dans les 2 broches (fig. 15.52).
Usinage indépendant pour chaque broche ou simultané pour l'ensemble des broches (synchronisées).





Fonctionnement synchronisé de l'

FIGURE 15.52 Schéma et zone de travail de tournage pièce très longue sur tour «Multiplex» avec CN «Mazatrol T 32»
Doc. Mazak

.3 Tours frontaux

usinage en grande série de pièces cylindriques courtes et de grande précision.
outils installés en parallèle sur un ou deux porte-outils (chariots) transversaux : succession très rapide d'outils en travail (fig. 5.53).

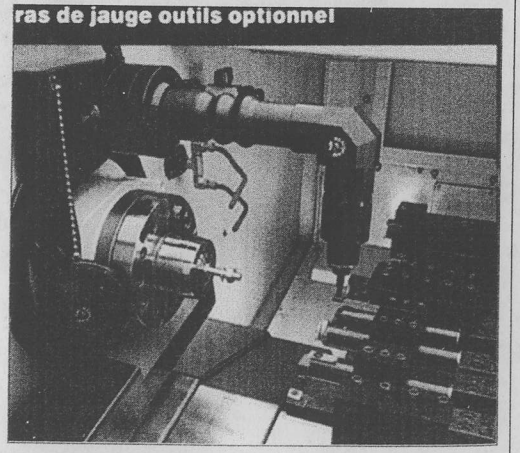


FIGURE 15.53
Zone de travail d'un tour frontal «Conquest GT».
Doc. Hardinge Brothers

9.4 Tours à décolleter

À commande numérique multi-axes : production de série grande à illimitée, avec actions simultanées d'outils 2 à 2.
Toutes les opérations d'usinage sont réalisées sur la machine avec outils spécifiques (de forme en particulier).
Capacités. Passage de barre en broche 16, 25, 32... 120 mm en mécanique courante ; de 2 mm à 12 mm en micro-mécanique.
Avance-barre pour alimentation continue de la broche avec :
- plusieurs tubes d'alimentation de diamètres différents : petites séries.
- stock tampon de barres alimentant automatiquement un seul tube : grandes séries.

Fréquence de rotation de broche en continu (de 0 à 15000 tr/min, en 1 seconde avec moteur intégré à la broche).
Différents équipements, selon les machines :
Porte-outils de 3 à 7 rayonnant autour de la pièce, avec mouvements indépendants (fig. 15.54).
Appareillages pour outils tournants : perçage et fraisage transversaux avec broche indexable (axe C).
Bitourelle recevant jusqu'à 25 outils.
Broche de reprise automatique de pièces pour usinage arrière sur machine.
Tourelle arrière pour outils tournants travaillant dans l'axe-pièce.

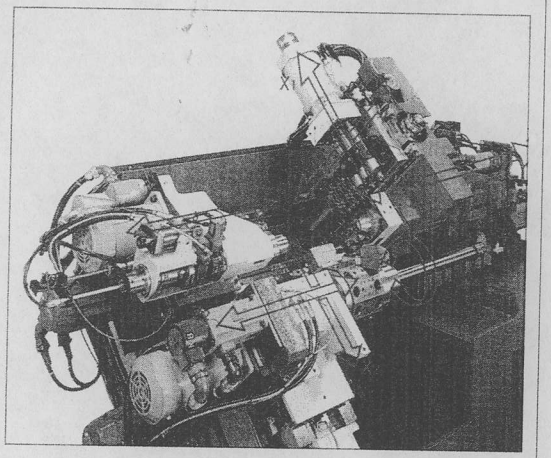
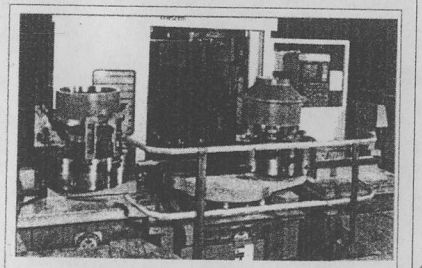


FIGURE 15.54
Tour à décolleter 7 axes «Cicom M20»
Doc. Citizen

9.5 Tours verticaux

À commande numérique : production de pièces volumineuses, type plate et courte : plateau porte-pièce horizontal de grand diamètre (jusqu'à quelques mètres) (fig. 15.55).



avec système de changement MANDRIN PALETTES AUTOMATIQUES type AP-3J-C diam. 1250 mm à 3 mors.
Référence CATERPILLAR Peoria (USA)

FIGURE 15.55
Station de transfert-pièces sur tour vertical «Mégaturn» palettisé.
Doc. Mazak

.6 **Tours séquentiels**

charioter et fileter. Mouvements mécanisés, avec règle de mesure des déplacements XZ : avaux de maintenance.

16 PROCÉDÉS D'ÉBAVURAGE

1. Généralités 503
   1.1 Ébavurage 503
2. Différentes bavures 503
3. Procédés d'ébavurage 504
4. Ébavurage par extrusion 504
5. Ébavurage par frottement-tribofinition 505
   5.1 Utilisation 506
6. Ébavurage par coupe 507
   6.1 Outil-main 507
   6.2 Outlil-main rotatif 507
   6.3 Outil-machine 508
7. Ébavurage par effet thermique 509
8. Ébavurage électro-chimique 509
9. Ébavurage par abrasion 509
10. Ébavurage mécano-cryogénique 510

1. Généralités

Les bavures sur les pièces mécaniques sont des excroissances de matière produites involontairement à l'obtention de ces pièces.
Elles sont néfastes aux pièces : dans le cycle des phases de production ; en utilisation fonctionnelle.
Elles sont normalisées en définition symbolique suivant la norme de qualité DIN 6784.

1.1 Ébavurage

Il ne produit qu'une très faible modification de forme des pièces :
chanfreins obtenus en ébavurage par coupe ; derme métallique modifié par les autres procédés d'ébavurage (tribofinition, abrasion...) sur toutes les surfaces de pièces soumises à « l'outil ».

Derme métallique

Il résulte du procédé de production et de la nature du matériau :
Macro et micro-rugosité des surfaces obtenues par coupe, découpe.
Résidus minéraux et oxydes divers sur les surfaces obtenues par moulage, forgeage.
– sans inclusions physiques, en moulage métallique : facilite l'ébavurage par frottement.
– avec inclusions physiques discontinues en moulage au sable : non favorable à l'ébavurage par frottement.

2. Différentes bavures

Elles diffèrent selon les procédés de fabrication.
Bavures de coupe. Fines bavures produites en fin de trajectoire d'outil par repoussage du métal.
Bavures de découpe. Très fines bavures produites au sectionnement de la matière (comme un morfil).
Bavures de moulage. Plus ou moins importantes selon le procédé utilisé, produites par écoulement du métal en fusion dans les joints du moule (étanchéité imparfaite).
Bavures de forgeage. Importantes bavures produites volontairement à l'obtention des pièces ; à éliminer par coupe, découpe.
Bavures de rectification. Très fines bavures produites par arrachement de matière en fin de trajectoire de meule, donnant un morfil.

1. Procédés d'ébavurage

Selon la forme, les dimensions des pièces et leur procédé de fabrication, l'ébavurage pourra s'effectuer par un ou plusieurs procédés.
Par coupe, avec outils mono et multi-arêtes, manuel ou machine.
Par frottement (tribofinition) avec action mécano-chimique.
Par abrasion, avec jet abrasif de poudre ou granulés.
Par effet mécano-cryogénique, avec refroidissement des pièces.
Par extrusion, avec pâte abrasive en circulation forcée.
Par effet thermique, avec brûlure des bavures.

Nota : Les procédés d'ébavurage agissant sur l'ensemble des surfaces provoquent également : superfinition, polissage, décapage, dégraissage.

Pièces en matériau dur. Les bavures sont cassantes, ce qui facilite leur élimination.
Pièces en matériau « tendre ». Les bavures ont tendance à se plier, nécessitant l'ébavurage par coupe, durcissement avant élimination, frottement.
À effectuer après un éventuel traitement thermique.
Pièces avec formes fonctionnelles. Filetages, cannelures... à protéger avant ébavurage.

4. Ébavurage par extrusion

Circulation forcée alternative ou continue d'une pâte abrasive dans la ou les formes intérieures de la pièce produisant une abrasion fine, sur les surfaces (fig. 16.1 et 2).
La pâte effectue sur les surfaces parcourues un rodage uniforme et un nettoyage, en absorbant les résidus de matière.
L'abrasion fine produit un rodage des surfaces.
L'outil, d'après « Extrude Hone » est un polymère plastique chargé d'abrasif dont les propriétés rhéologiques spéciales permettent d'abraser les surfaces contre lesquelles il circule de manière sélective et contrôlable.

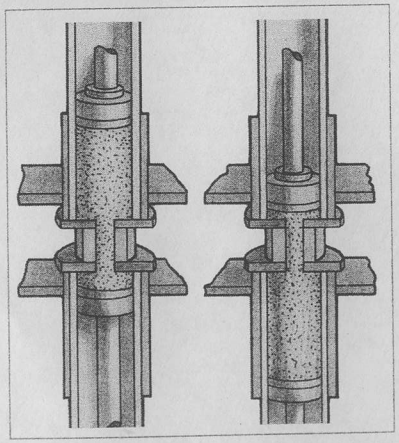


FIGURE 16.1
Pricipe d'ébavurage - polissage par extrusion en mouvements alternatifs.
Doc. Extrude Hone

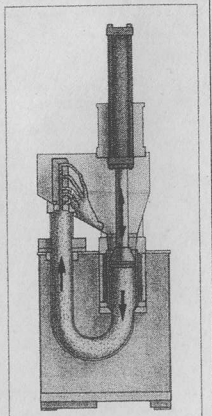


FIGURE 16.2
Principe d'ébavurage - polissage par extrusion en mouvement continu.
Doc. Extrude Hone

Utilisation

Ébavurage et superfinition des outillages (moules métalliques et matrices) en fini-poli ; de pièces mécaniques (hydraulique, alimentaire, médicale...)
Ébavurage des formes intérieures, avec rayonnage et rodage, après tous procédés de fabrication (coupe, érosion...)
Décalaminage intérieur de pièces creuses coulées.

Nota : Avec un gabarit, ébavurage-superfinition de surfaces externes de profil quelconque (fig. 16.3).
Machines. Pour la production en série de tous types de pièces (fig. 16.4).

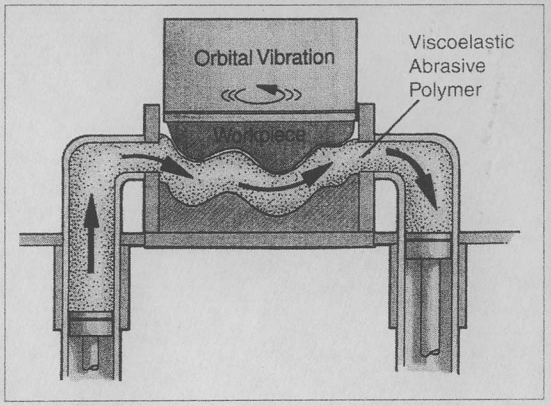


FIGURE 16.3 Principe d'ébavurage - polissage d'une surface extérieur.
Doc. Extrude Hone

FIGURE 16.4 Machine d'ébavurage - polissage
Doc. Extrude Hone

5. Ébavurage par frottement-tribofinition

Frottement réciproque entre des pièces en vrac mélangées à des agents abrasifs dans une enceinte fournissant l'énergie du brassage.
Les interactions obtenues résultent du frottement des glissements et roulements des pièces et de l'abrasif.
Le rapport glissement/frottement définit le degré de finition (du martelage au polissage).
L'agent abrasif, très dur et homogène, arrache par frottement de faibles quantités de matière sur toutes les surfaces extérieures des pièces.
Constitué de grains fins agglomérés avec un liant.
Céramique. Ébavurage grossier et prépolissage simultané dans des machines à tambour et vibrateurs.
Résinoïde. Ébavurage et polissage simultanés de tous métaux.
Billes métalliques. Brunissage et brillantage.
Adjuvants physico-chimiques biodégradables agissant aux interfaces abrasif/pièces.

5.1 Utilisation

Ébavurage et polissage (grossier à fin) simultané et total en extérieur des pièces.

Machines

Avec cuve de maintien des pièces à mouvements rotatif, vibratoire, rectiligne-alternatif ou continu (cuve statique).

Mouvement rotatif. Brassage aléatoire des pièces en cuve (chocs possibles par éboulement des pièces) (fig. 16.5).

Utilisation

Pièces métalliques moulées, forgées.

Ébavurage peu rapide.

Mouvement vibratoire. Brassage uniforme en fond de cuve (en auge) : pièces essentiellement soumises à l'action abrasive (fig. 16.6).

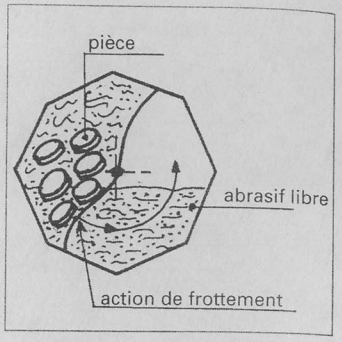


FIGURE 16.5 Schéma de principe du brassage de pièces en ébavurage par mouvement rotatif.

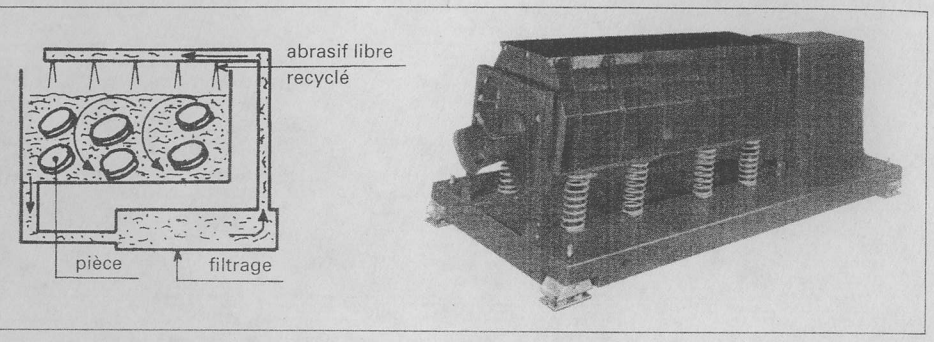


FIGURE 16.6 Schéma de principe du brassage de pièces en ébavurage par mouvements vibratoires et machine (doc. USF Traitement de surface).

Ébavurage-polissage rapide.

Mouvement rectiligne-alternatif.

Déplacement de la pièce dans l'abrasif.

Cuve linéaire pour grandes et grosses pièces métalliques.

Ébavurage-polissage long.

Mouvement continu. Rotation des pièces maintenues séparément par une broche tournante dans l'abrasif statique ou en mouvement (fig. 16.7).

Ébavurage-polissage rapide de pièces métalliques.

Cuve statique. Désintégration par projection de granulés (plastique) à grande vitesse (100 m/s).

Ébavurage-polissage de matériaux divers : métallique, plastique, (élastomère, thermodurcissables).

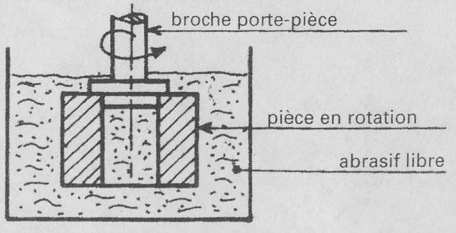


FIGURE 16.7 Schéma de principe en ébavurage de pièce par mouvement continu.

6. Ébavurage par coupe

Sectionnement d'arêtes rectilignes, circulaires, sinueuses, avec outils manuels ou machine.
Ébavurage localisé avec maintien des arêtes vives, sans détérioration des surfaces.

6.1 Outil-main

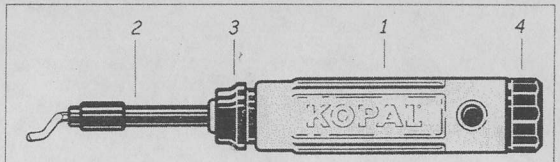
Ébavureur tournant, type manivelle à poignée de préhension, avec différents outils amovibles : à chanfreiner d'extérieur, d'intérieur (fig. 16.8) avec :

Rotation à droite ou à gauche.

Angle de coupe réduit pour copeaux courts (fontes, bronze).

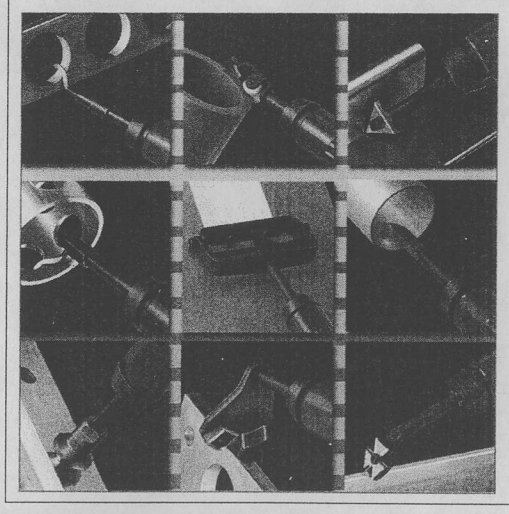
Carbure pour matériaux abrasifs, composites.

Diamant pour matériaux très durs.



1 Manche en acétal
2 Tige télescopique
3 Bague de blocage de la tige
4 Bouchon de réserve d'outils facile et sûr

FIGURE 16.8 Outil-main d'ébavurage par coupe. *Doc. Kepal*



Utilisation

Chanfreinage rayonnage extérieur, localisé ou non sur pièces finies par coupe, abrasion... (fig. 16.9).

FIGURE 16.9
Différentes opérations de chanfreinage avec outil-main d'ébavurage. *Doc. Vargus*

6.2 Outil-main rotatif

Fraise ou meule : cylindrique à queue de petit diamètre en carbure, animée en rotation par flexible, avec guide de profondeur de passe (fig. 16.10 et 11).

Utilisation

Contournage de tous profils extérieurs sur pièces (cubiques, plates) finies par coupe, abrasion.

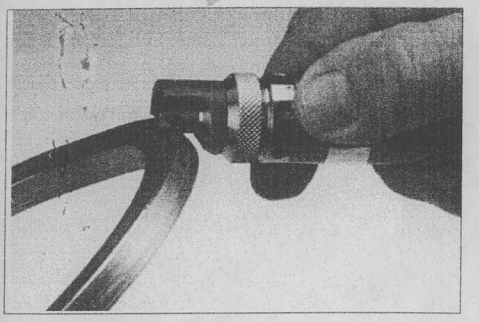


FIGURE 16.10 Outil-main rotatif par fraisage. *Doc. Kepal*

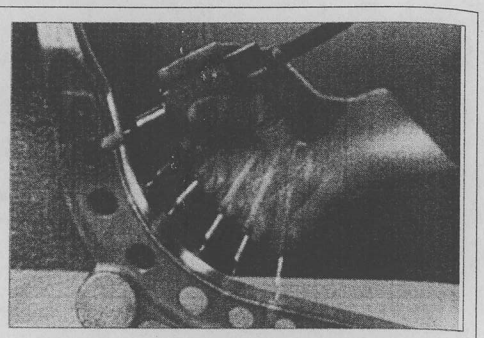


FIGURE 16.11 Outil-main rotatif par meulage. *Doc. Suhner*

6.3 Outil-machine

Fraise à chanfreiner pour fraiseuses, centres d'usinage (voir chapitre « Procédés de fraisage »)
Utilisation. Chanfreinage par contournage de tous profils sur faces avant (éventuellement arrière) de pièces en cours d'usinage, avec MOCN (fig. 16.12).
Outil mono-arête pour tours, centres de tournage (voir chapitre « Procédés de tournage »).
Utilisation. Chanfreinage de formes cylindriques avant et arrière de pièces en cours d'usinage, sur tours et CT (fig. 16.13).
Limes rotatives de différentes formes, en carbure monobloc avec ou sans brise-copeaux.
Utilisation sur robot d'ébavurage (fig. 16.14) ; en outil-main rotatif également.

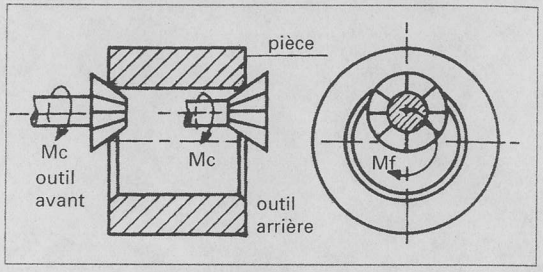


FIGURE 16.12 Chanfreinage par contourage avec fraise sur fraiseuses CN et centres d'usinage.

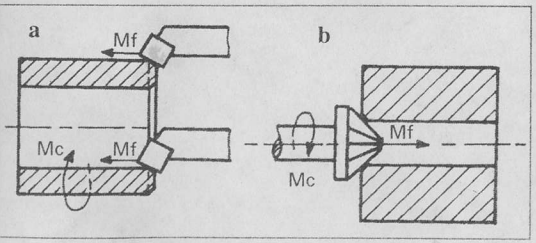


FIGURE 16.13 Chanfreinage sur tours et centres de tournage
a. Outil d'enveloppe
b. Outil de forme

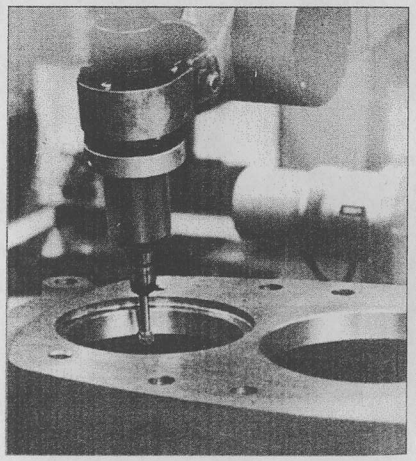


FIGURE 16.14 Opération d'ébavurage à la lime rotative sur robot. *Doc. Sandwik Coromant*

7. Ébavurage par effet thermique

Destruction par brûlure (à 3 000 °C) des bavures par explosion d'un mélange hydrogène – oxygène comprimé dans une chambre avec les pièces (procédé Bosch Rotofinish).
Utilisation. Ébavurage de série sur machines spécifiques dans les formes intérieures de pièces mécaniques avec rapidité (20 ms).

8. Ébavurage électrochimique

Érosion des bavures par électrolyse circulant suivant une trajectoire définie par un outillage spécifique (électrode de forme) au type de pièces (voir chapitre « Procédés d'érosion »).
Utilisation. Pour travaux de série sur machine spécifique.

9. Ébavurage par abrasion

Usure des bavures par brossage avec outil rotatif (fig. 16.15) ou linéaire (bande abrasive) métallique, synthétique : ébavurage, grossier ou fin selon abrasif, de pièces tubulaires de grand diamètre, moulées, forgées. Automatisation avec robot multi-axes de positionnement des pièces.
Usure des bavures par jet abrasif.
Destruction des bavures par analogie à la découpe par jet d'eau (voir chapitre « Procédés de découpe »).
Disque abrasif à lamelles agissant sur toute la longueur des arêtes de lamelles (fig. 16.16).

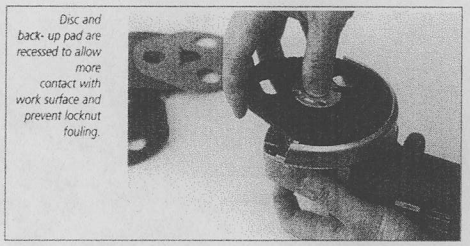


FIGURE 16.15 Disque abrasif pour outil-main rotatif. *Doc. Avos TM - distributeur Norton*

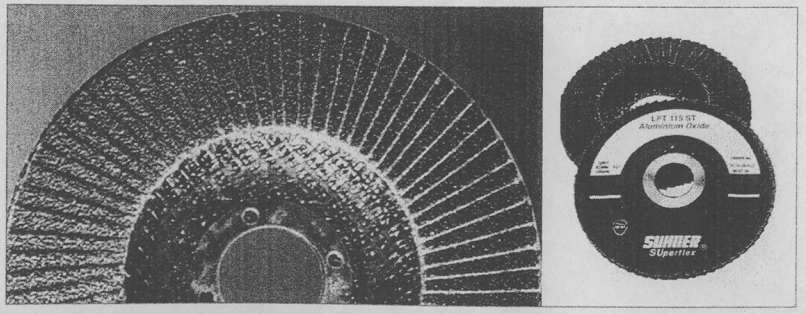


FIGURE 16.16 Disque abrasif à lamelles. *Doc. Comet et Suhner*

Bandes abrasives, constituées d'agrégats de grains (corindon, à structure ouverte) fixés sur support toile polyester : renouvellement progressif de la couche abrasive (comme les meules) améliorant durée de vie de la bande (fig. 16.17 et 16.18).

Multirouleaux abrasifs : outils « Fladder » avec six rouleaux tournant deux à deux en sens opposés, associés à un mouvement oscillatoire (fig. 16.19).

Grains. Corindon pour aciers faiblement alliés et matériaux non métalliques.
Zircon pour aciers alliés.

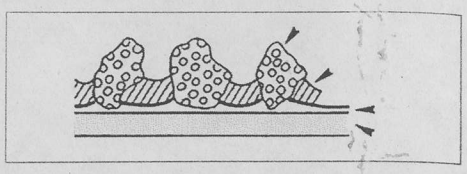


FIGURE 16.17 Constitution de bandes abrasives (type R273). *Doc. Norton*

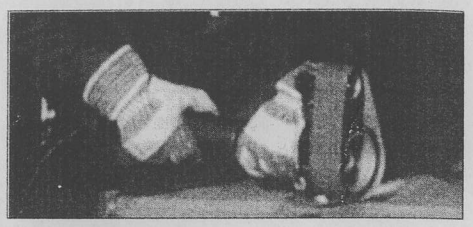


FIGURE 16.18
Outil-main rotatif à bande abrasive.
Doc. Suhner

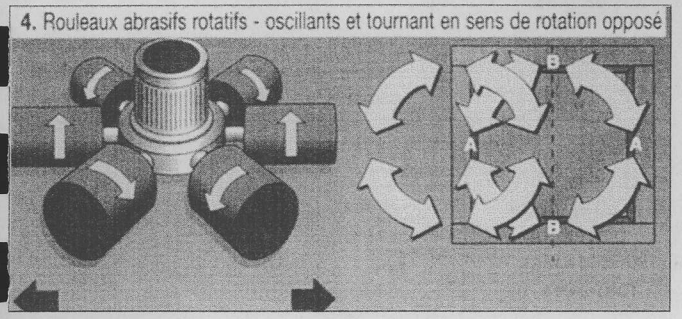


FIGURE 16.19
Schéma de principe de l'outil à multirouleaux abrasifs.
Doc. Fladder

10. Ébavurage mécano-cryogénique

Destruction par rupture sous vibrations ou projection de granulés plastique à grande vitesse sur les pièces après refroidissement par l'azote liquide (−130 °C) les rendant cassantes (procédé cryojet Messer-Griesheim).
Ébavurage interne et externe des pièces métalliques.

DELAGRAVE ÉDITION – PARIS – N° D'ÉDITEUR 8222 – NOVEMBRE 2000

Normandie Roto impression s.a., 61250 Lonrai - N° d'impression 002737 - Imprimé en France